



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN COMPUTACIÓN

**ENRUTAMIENTO Y POSICIONAMIENTO
INTEGRADO EN REDES MÓVILES AD HOC**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
**DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA
COMPUTACIÓN**

P R E S E N T A:

M. EN C. ANABEL PINEDA BRISEÑO*

DIRECTORES:
**DR. ROLANDO MENCHACA MÉNDEZ
DR. JOSÉ GIOVANNI GUZMÁN LUGO**

México, D.F.

Diciembre de 2013



*Becario CONACYT

A Nicolás, Elsa, Aarón Nicolás, Elsa Yolisma,
María del Refugio, Edgar Azaél, Ivonne Marié, Jesús Iván y Edgar;
mi familia



A la Lic. Carmen Aristegui Flores.
Un humilde tributo por su lucha constante por la libertad de expresión.

Agradecimientos

La presenta tesis está basada en trabajo realizado gracias al financiamiento del Instituto México Estados Unidos de la Universidad de California (UC MEXUS) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACyT), así como del Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal (ICyT-DF).

Al Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI) del IPN por haber apoyado a través de una beca parte de los trabajos realizados en el marco de esta tesis doctoral.

Al Centro de Investigación en Computación del Instituto Politécnico Nacional, por el soporte institucional dado en la realización de este trabajo.

Al Instituto Tecnológico de Matamoros por todo el apoyo brindado en la realización de los estudios doctorales.

¡Gracias!

Anabel Pineda Briseño

Un agradecimiento especial:

A Dios por acompañarme en todo momento y por guiarme día a día. ¡Gracias Señor por darme la oportunidad de poder cumplir uno de mis más grandes sueños!

A mi familia, Nicolás, Elsa, Aarón Nicolás, Elsa Yolisma, María del Refugio, Ivonne Marié, Jesús Iván, Edgar Azaél y Edgar.

A mis directores de tesis Dr. Rolando Menchaca Méndez y Dr. José Giovanni Guzmán Lugo, por su apoyo incondicional durante todo mi proceso de formación doctoral, por sus sabios consejos y apoyo moral.

También agradezco profundamente al Dr. Miguel M. Ruiz por darme la oportunidad para realizar una estancia de investigación en la Universidad de Murcia, España. Asimismo, al Dr. Marco Moreno Ibarra por todo su apoyo durante mi estancia en el CIC-IPN.

A todos mis profesores que me brindaron su valiosa enseñanza y su apoyo académico.

A mis amigos y compañeros por el apoyo y motivación que de ellos he recibido.

A la mesa de sinodales por su dedicación y apoyo en la revisión del trabajo de tesis. Asimismo, por sus observaciones y recomendaciones que ayudaron a enriquecer esta investigación.

A todas las personas que de una u otra forma colaboraron en la realización de este trabajo.

¡Mi más profundo agradecimiento!

Anabel Pineda Briseño

Resumen

Este trabajo de tesis doctoral aborda el diseño, evaluación y análisis de algoritmos distribuidos de enrutamiento y posicionamiento integrados en redes móviles ad hoc (MANETs). Los resultados de esta investigación se dividen en tres partes:

La primera parte consiste en un análisis detallado, basado en simulaciones, de cuatro de los algoritmos de posicionamiento más representativos para MANETs. Los algoritmos evaluados son: DV-Hop, Amorphous, Centroid y APIT. En el análisis experimental se consideraron escenarios con diferentes modelos de propagación de señal de radio, así como un número incremental de balizas y la movilidad de los nodos.

La segunda parte de esta investigación introduce el método multilateración probabilística (MP) para estimar la posición de un nodo basado en la posición de tres o más balizas y las distancias estimadas de manera imprecisa hacia ellas. A diferencia de los enfoques probabilísticos existentes, multilateración probabilística es adecuado para los algoritmos de posicionamiento libres de distancia para MANETs porque no hace fuertes suposiciones sobre las propiedades de las estimaciones de distancia utilizadas para calcular las posiciones de los nodos. MP tiene cuatro ventajas principales sobre trilateración, el método tradicional empleado para estimar posición. (1) MP elimina el problema de *inconsistencia* debido a que puede ser utilizado, al mismo tiempo, un número arbitrario de balizas 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 balizas individuales, 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 balizas no se intersectan o intersectan en muchos puntos. (4) El método de multilateración probabilística se desempeña igual que trilateración con las estimaciones de distancias perfectas sin costo computacional extra.

La tercera parte de esta investigación consiste en un marco que propone la integración de enrutamiento *multicast* y posicionamiento basado en regiones de interés definidas por mallas. En este nuevo enfoque se propone utilizar la misma señalización de control, basada en regiones de interés, para apoyar el enrutamiento y el posicionamiento. También se presenta el protocolo *POSTAL PRIME*, que es una instanciación de este marco de trabajo de enrutamiento y posicionamiento integrado. *POSTAL PRIME* emplea el concepto de región de interés para identificar los componentes conexos de la red que confinan las fuentes y los destinos (en enrutamiento), y las balizas y los nodos con interés en conocer su posición (en posicionamiento), de manera que se restringe la señalización en estas regiones. *POSTAL PRIME* calcula mallas de enrutamiento y posicionamiento compuestas por caminos más cortos en términos del número de saltos.

Abstract

This dissertation addresses the design, evaluation and analysis of integrated distributed routing and positioning algorithms for mobile ad hoc networks (MANETs). The results from this research are divided into three main sections.

The first part consists in a detailed simulation-based analysis of four of the most representative positioning algorithms for MANETs, namely, DV-Hop, Amorphous, Centroid and APIT. In our experimental analysis we considered scenarios with different radio-signal propagation models, as well as increased number of beacons and node mobility.

The second part of this research 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. Unlike previous probabilistic approaches, the probabilistic multilateration is well suited for range-free positioning algorithms for MANETs because it does not make strong assumptions about the properties of the distance estimates used to compute the nodes locations. Our method has four main advantages over the traditional trilateration method. (1) It eliminates the *non-consistency* problem because an arbitrary number of references can be used at the same time to estimate the position of a node. (2) It is more resilient to collinearity (coplanarity) because the proposed probability density function does not have local maximums outside of the polygon (polyhedron) of minimum area (volume) that contains the circumferences (spheres) defined by the probability density functions of the individual references and hence, the probabilistic multilateration can not provide arbitrarily bad estimations as it is the case of the trilateration method. (3) The probabilistic multilateration method performs well even if the circumferences (spheres) defined by the references do not intersect or intersect at many points. (4) With perfect distance estimates, the probabilistic multilateration method performs just as well as trilateration with no extra computational cost.

The third part of this research consists in integrated framework for positioning and multicast routing in mobile ad hoc networks based on interest-defined mesh enclaves. In this new approach, the same control signaling is used to support multicast routing and positioning, and the distinction between on-demand and proactive signaling for routing and positioning is eliminated and interest-driven signaling is used instead. The Protocol POSTAL PRIME 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 span sources and destinations in routing, and span beacons and nodes with interest in computing their position. This way, we can restrict signaling to these regions. Then, topological information is used to compute meshes composed of hop-distance shortest-paths.

Índice general

Resumen	VII
Abstract	IX
1. Introducción	1
1.1. Introducción	3
1.2. Planteamiento del problema	4
1.3. Objetivos	5
1.4. Justificación	5
1.5. Contribuciones	6
1.6. Organización de la tesis	7
2. Antecedentes y trabajo relacionado	9
2.1. Introducción	11
2.2. Antecedentes	11
2.2.1. Redes móviles ad hoc (<i>MANETs</i>)	11
2.2.1.1. Redes inalámbricas	11
2.2.1.2. Definición	12
2.2.1.3. Características	13
2.2.1.4. Aplicaciones	14
2.2.2. Enrutamiento en MANETs	14
2.2.2.1. Definición	14
2.2.2.2. Tipos de enrutamiento	15
2.2.3. Posicionamiento en MANETs	15
2.2.3.1. Definición	15
2.2.3.2. Técnicas de localización	15
2.2.3.3. Aplicaciones	21
2.3. Trabajo relacionado	22
2.3.1. Enrutamiento	22
2.3.1.1. On-Demand Multicast Routing Protocol (ODMRP)	22
2.3.1.2. Protocol for Unified Multicasting through Announcements (PUMA)	23
2.3.1.3. Multicast Ad Hoc On-Demand Distance Vector (MAODV)	24
2.3.1.4. An Interest-Driven Approach to Integrated Unicast and Multicast Routing in MANETs (PRIME)	26
2.3.2. Posicionamiento	27

2.3.2.1.	DV-Hop	27
2.3.2.2.	Amorphous	28
2.3.2.3.	Centroid	30
2.3.2.4.	APIT	31
2.4.	Resumen general	33
3.	Análisis comparativo de algoritmos de posicionamiento libres de distancia para MANETs usando modelos de propagación de radio señal en 2D y 3D	35
3.1.	Introducción	37
3.2.	Algoritmos de posicionamiento libres de distancias	38
3.3.	Algoritmos de posicionamiento libres de distancias: Extensiones 3D	38
3.3.1.	DV-Hop 3D	39
3.3.2.	Amorphous 3D	41
3.3.3.	Centrod 3D	45
3.3.4.	APIT 3D	46
3.4.	Resultados Experimentales	47
3.4.1.	Validación de los algoritmos	47
3.4.2.	Resultados experimentales	48
3.4.2.1.	Posicionamiento en dos dimensiones	49
3.4.2.2.	Posicionamiento en tres dimensiones	50
3.5.	Conclusiones	55
4.	Multilateración Probabilística	57
4.1.	Introducción	59
4.2.	Trilateración	59
4.3.	Multilateración probabilística	62
4.3.1.	Estimación de posición en 2D	62
4.3.2.	Estimación de posición en 3D	64
4.3.3.	Propiedades	65
4.4.	Trilateración vs Multilateración Probabilística	65
4.4.1.	Análisis comparativo teórico	66
4.4.1.1.	Ejercicio comparativo 1	66
4.4.1.2.	Ejercicio comparativo 2	68
4.4.2.	Análisis comparativo experimental	71
4.4.2.1.	Posicionamiento en dos dimensiones	73
4.4.2.2.	Posicionamiento en tres dimensiones	74
4.5.	Conclusiones	76

5. POSTAL PRIME: Protocolo de enrutamiento y posicionamiento integrado para redes móviles ad hoc	83
5.1. Introducción	85
5.2. POSTAL PRIME	86
5.2.1. Resumen general	86
5.2.2. Activación y desactivación de mallas	87
5.2.3. Establecimiento y mantenimiento de mallas	88
5.2.4. Procesamiento de anuncios de malla	89
5.2.5. Transmisión de anuncios de malla	91
5.2.6. Regiones de interés	91
5.2.7. Retransmisión de paquetes y reparaciones locales	94
5.2.8. Elección de núcleos (Enrutamiento <i>multicast</i>)	95
5.2.9. Estimación de posición	96
5.3. Validación experimental	96
5.3.1. Desempeño de los protocolos	97
5.4. Conclusiones	101
6. Conclusiones y trabajo futuro	103
6.1. Conclusiones	105
6.2. Contribuciones originales	106
6.3. Trabajo futuro	106
A. Derivación del valor esperado de longitud de un salto en una red 3D	107
B. Productos de investigación	109
Referencias	111

Índice de figuras

2.1. Tipos de redes inalámbricas.	12
2.2. Ejemplo de una red móvil ad hoc.	13
2.3. Método Ángulo de Llegada (AoA).	16
2.4. Método Tiempo de Llegada (ToA).	16
2.5. Método Diferencia de Tiempo de Llegada (TDoA).	17
2.6. Método Intensidad de la Señal Recibida (RSSI).	17
2.7. Método Conteo de Salto (Hop Count).	18
2.8. Método Triangulación.	18
2.9. Método Trilateración.	19
2.10. Proceso de unión en ODMRP.	23
2.11. Propagación de anuncios <i>multicast</i> en PUMA.	24
2.12. Proceso de establecimiento del árbol <i>multicast</i> en MAODV.	25
2.13. Ejemplos de una región de interés <i>multicast</i> , su región de interés 1-extendida asociada y la región de interés de un flujo <i>unicast</i>	26
2.14. Ejemplo de corrección de una baliza en DV-Hop.	28
2.15. Ejemplo de estimación de distancias en Amorphous.	29
2.16. Ejemplo de intercambio de distancias entre nodos vecinos en Amorphous.	29
2.17. Ejemplo de estimación de MC en Centroid.	31
2.18. Algoritmo APIT basado en área.	32
2.19. Enfoque escaneo de malla.	32
3.1. Deficiencias de trilateración. (a) Incertidumbre. (b) Ambigüedad. (c) Inconsistencia. (d) Ejemplo de una red no isotrópica.	42
3.2. Derivación de la Ecuación 3.4	44
3.3. Efecto de movilidad y número de balizas cuando se utiliza un modelo de propagación 2D.	51
3.4. Efecto de movilidad y número de balizas cuando se utiliza un modelo de propagación 3D.	53
4.1. Multilateración probabilística usando funciones Gaussianas. (a) Función de densidad de probabilidad definida para una baliza β . (b) Superposición de tres funciones de probabilidad. Cada una definida por una baliza diferente. (c) Función de densidad de probabilidad de localización de un nodo dadas tres balizas. (d) Superposición de cuatro funciones de densidad de probabilidad.	63

4.2. Estado 1. Estado ideal para estimar la posición de un nodo mediante trilateración y multilateración probabilística.	66
4.3. Estado 2. Estado en el que las tres circunferencias no intersecan en ningún punto.	67
4.4. Estado 3. Estado donde tres circunferencias intersecan en más de un punto.	67
4.5. Estado 4. Estado que visualiza la intersección únicamente de un par de circunferencias.	68
4.6. Estado 5. Estado que caracteriza una circunferencia circunscrita en otra y la intersección de un par de circunferencias.	68
4.7. Estado 6. Estado que ilustra tres circunferencias colineales.	69
4.8. Estado 7. Estado que muestra tres circunferencias superpuestas.	69
4.9. Colinealidad entre balizas en un espacio bidimensional (2D).	70
4.10. Coplanaridad entre balizas en un espacio tridimensional (3D).	73
4.11. Efecto de movilidad y número de balizas cuando se utiliza un modelo de propagación 2D.	77
4.12. Efecto de movilidad y número de balizas cuando se utiliza un modelo de propagación 3D.	79
5.1. Ejemplos de regiones de interés de un flujo <i>multicast</i> y de una baliza. Asimismo, sus respectivas regiones de interés 1-extendida.	93
5.2. Efecto de movilidad y número de balizas cuando se utiliza un modelo de propagación 3D.	99
A.1. Derivación del valor esperado de la longitud de un salto en una red 3D. . .	107

Índice de tablas

2.1. Aplicaciones de MANETs.	14
2.2. Resumen de distancias entre nodos y balizas en Amorphous.	29
2.3. Resumen de MC del nodo N con respecto a las balizas B_1, B_2, B_3 y B_4	31
2.4. Información de balizas del Nodo N_1	32
2.5. Información de balizas del Nodo N_2	32
2.6. Información combinada del nodo N_1	32
2.7. Información combinada del nodo N_2	32
3.1. Ambiente de simulación de los experimentos de validación.	48
3.2. Resultados de los experimentos de validación.	48
4.1. Valores de entrada empleados en la evaluación de la colinealidad entre balizas.	71
4.2. Valores de salida de la evaluación de la colinealidad entre balizas.	72
4.3. Valores de entrada empleados en la evaluación de la coplanaridad entre balizas.	74
4.4. Valores de salida de la evaluación de la coplanaridad entre balizas.	75
4.5. Valores de entrada empleados en la evaluación de la coplanaridad entre balizas.	75
4.6. Ambiente de Simulación (2D).	76
5.1. Ambiente de simulación	97

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

Los avances de la tecnología han impulsado la evolución de las comunicaciones inalámbricas (WiFi, Bluetooth, Infrarrojo, GSM, etc.). En este sentido, la ploriferación de dispositivos móviles e inalámbricos ha fomentado la demanda de aplicaciones conscientes del contexto (consideradas como clave en el desarrollo de aplicaciones de cómputo ubicuo [23][13]), en las cuales la localización¹ es vista como una de las formas de contexto más importantes [20][24][44][33]. Por tal motivo, para muchos escenarios como la coordinación de equipos de campo, la información de localización se ha convertido en información esencial e indispensable. Su gran potencial se ve reflejado en áreas como la seguridad personal, la navegación, la búsqueda y rescate, el turismo, el entretenimiento [23][24] y en los servicios de red [36][20][47].

En la actualidad, una de las principales alternativas para determinar la posición de un dispositivo es a través del GPS (*Global Positioning System*), lo cual, en la mayoría de los casos es inviable en sistemas a gran escala o sistemas móviles. Aunado a esto, existen otras limitantes [44][25] que están íntimamente relacionadas a las características de exactitud, precisión, costo, disponibilidad, cobertura, etc [23]. Una restricción afín a esta última característica tiene que ver con el hecho de que las soluciones existentes, en su mayoría, operan solamente en interiores.

En relación a las necesidades actuales, artículos seminales [43][42][23][20] especifican que un sistema de posicionamiento ideal debe contemplar en su diseño los siguientes aspectos: (i) cobertura ubicua, es decir, la capacidad de poder proporcionar posicionamiento al usuario en cualquier momento y lugar que éste se encuentre, ya sea en exteriores (plazas, parques, calles, etc.) o interiores (centros comerciales, oficinas, museos, etc.) con buena precisión [43][55][47]; (ii) incorporar posicionamiento relativo ¿Qué quiere decir? Un sistema de posicionamiento debe ser diseñado de tal manera que a través de la cooperación de unos nodos (sistemas móviles) con otros nodos cercanos se pueda estimar la posición de los mismos [44][36]; y (iii) hacer uso de la infraestructura existente.

¹En este trabajo serán usados de manera indistinta los conceptos de posicionamiento y localización.

Estas características, particularmente el posicionamiento relativo y los retos que de este deriven, motivan el uso de nuevos diseños donde no se requiera el uso de infraestructura o control central para obtener la posición de un móvil. Esta nueva manera de proporcionar localización es soportada por las Redes Móviles Ad Hoc (MANET, *Mobile Ad hoc NETWORKS*) ya que por sus características tanto de adaptabilidad como de movilidad ofrecen el soporte ideal para este tipo de esquemas.

Este trabajo de tesis doctoral centra su investigación en el ámbito de posicionamiento y enrutamiento en MANETs, particularmente en el diseño de algoritmos robustos, escalables y eficientes. De esta manera, se pretende el diseño de un nuevo esquema de posicionamiento que minimice el error de localización. Asimismo, la integración de éste con algoritmos de enrutamiento. La idea de unificar ambas funcionalidades es con el objetivo de optimizar el desempeño de los algoritmos involucrados en términos de precisión, costo de comunicación, cobertura y complejidad.

1.2. Planteamiento del problema

Los escenarios actuales demandan el desarrollo de aplicaciones conscientes del contexto donde la localización juega un papel fundamental. Estas aplicaciones deben ser soportadas por esquemas distribuidos pensados para escenarios en movimiento. Más aún, los algoritmos distribuidos deben poseer generalidad y flexibilidad. Esto implica el diseño de algoritmos robustos, escalables y eficientes. Sin embargo, los requerimientos que demandan este tipo de aplicaciones contrastan con la forma de operar de los algoritmos de posicionamiento para MANETs propuestos hasta hoy. Primero, porque estos algoritmos fueron diseñados para escenarios específicos donde la movilidad de los nodos o sistemas móviles es nula. Segundo, porque fueron diseñados para operar únicamente en espacios bidimensionales (2D), cuando en general los nodos se posicionan en el espacio tridimensional (3D). Tercero, porque estos algoritmos se ejecutan en paralelo con otros servicios, aplicaciones o protocolos, lo cual es ineficiente desde el punto de vista de utilización del ancho de banda. Cuarto, porque estos algoritmos en su mayoría hacen que la red sea inundada frecuentemente para mantener información de localización actualizada, operación que se lleva a cabo aún cuando el porcentaje de nodos interesados en estimar su posición es mínimo. Quinto, porque los algoritmos considerados estándar en posicionamiento para MANETs emplean el método de trilateración para estimar la posición de sus nodos, el cual sufre de *incertidumbre*, *inconsistencia* y *ambigüedad*. Ahora bien, debido a las limitantes que poseen las propuestas actuales, este trabajo centra su investigación en proponer estrategias que se aproximen a las soluciones ideales que demandan los requerimientos de las aplicaciones actuales. Este trabajo plantea minimizar el error de localización para brindar servicios con mejor precisión, minimizar el costo de comunicación para ser más eficientes en la utilización de los recursos, maximizar la cobertura de los mismos y diseñar los algoritmos para que éstos puedan operar en espacios 2D y 3D. En relación a esto, es importante hacer énfasis que el diseño de estrategias que implica la optimización simultánea, tal como se plantea aquí, es considerada por la literatura como uno de los problemas abiertos más importantes del posicionamiento en MANETs.

1.3. Objetivos

Objetivo general

Diseñar, implementar y validar un conjunto de algoritmos integrados de enrutamiento y posicionamiento para MANETs. Los algoritmos deben ser robustos (tolerantes a cambios topológicos) y escalables (tamaño de la red y tráfico), deben funcionar tanto en espacios 2D como en espacios 3D, y se deben validar experimentalmente.

Objetivos específicos

- Implementar y realizar un estudio comparativo de los principales algoritmos de posicionamiento 2D en MANETs.
- Extender a 3D, implementar y realizar un estudio comparativo de los principales algoritmos de posicionamiento en MANETs.
- Diseñar un método de estimación de posición para reducir el impacto negativo producto de las debilidades que posee el método de trilateración.
- Diseñar, implementar e integrar un conjunto de algoritmos de enrutamiento y posicionamiento 2D y 3D.
- Diseñar escenarios de experimentación para medir el desempeño de los algoritmos propuestos.
- Realizar pruebas experimentales de los algoritmos propuestos, evaluarlos mediante herramientas de simulación y presentar el análisis de los resultados obtenidos.

1.4. Justificación

El avance constante de la tecnología, traducido en una amplia disponibilidad de dispositivos pequeños de bajo costo con capacidad de poder usarlos para adquirir una diversidad de servicios, ha llevado a la necesidad de desarrollar servicios que ofrezcan posicionamiento en cualquier momento y en cualquier lugar. Dicho progreso, también ha brindado la oportunidad de desarrollar sistemas de posicionamiento eficientes en términos de costo, exactitud y precisión a expensas de incrementar el número de problemáticas por resolver.

No obstante, los sistemas de posicionamiento propuestos hasta hoy presentan ventajas que los han hecho ideales para determinado tipo de aplicaciones. En este sentido, el diseño de un algoritmo debe contemplar varios aspectos como son la generalidad y flexibilidad del mismo. Esto conlleva a diseñar algoritmos robustos, escalables y con buena precisión. Estas características derivan problemas los cuales describe la literatura como difíciles de resolver debido a la heterogeneidad de infraestructura tecnológica que poseen los escenarios reales y a su gran escala.

1.5. Contribuciones

Las contribuciones de la tesis que acentúan los méritos técnicos y científicos del trabajo de investigación son:

- Las implementaciones en NS-2 de las versiones 2D y 3D de **DV-Hop**, **Amorphous**, **Centroid** y **APIT**, que son los algoritmos más representativos del estado del arte en el ámbito de MANETs. Estas implementaciones pueden ser descargadas de la página <http://sourceforge.net/projects/posalgorithms/>.
- La introducción de una nueva técnica denominada **Multilateración Probabilística** que es usada para estimar la posición de un nodo. Esta técnica se basa en la posición conocida de tres o más referencias² y en las distancias a dichas referencias, las cuales son estimadas de manera imprecisa. La principal virtud de multilateración probabilística es que reduce de manera significativa el impacto negativo producto de las debilidades que posee el método de trilateración empleado para estimar posición en 2D y 3D. Esta cualidad le permite a la multilateración probabilística ofrecer un mejor desempeño que la trilateración, deducción a que se ha llegado después del análisis de los resultados experimentales comparativos basados en simulaciones realistas.
- Se propone un nuevo esquema de posicionamiento llamado **POSTAL** que opera en espacios de 2D y 3D. La idea principal es brindar el soporte que necesitan muchas de las aplicaciones actuales, desplegadas en espacios 3D, para llevar a cabo sus tareas de manera exitosa. En escenarios reales, generalmente los dispositivos móviles y los usuarios que usan sistemas de esta naturaleza se ubican en diferentes pisos de un edificio, bajo el agua, en terrenos montañosos, etc. Por ejemplo, en las aplicaciones que tienen como tarea las operaciones de búsqueda y rescate es sumamente importante determinar con mayor exactitud y precisión, y a bajo costo (tanto computacional como económico) la ubicación de una persona (usualmente perdida). Sin embargo, en la actualidad la mayoría de las propuestas son modeladas y evaluadas únicamente en espacios 2D.
- La propuesta está basada en ideas de algoritmos de enrutamiento, lo cual brinda la oportunidad de realizar enrutamiento en forma unificada en 2D y 3D. El protocolo muestra una manera original de combinar los esquemas proactivo y reactivo con regiones de interés en el primer protocolo de enrutamiento y posicionamiento integrado denominado **POSTAL PRIME**. El concepto de regiones de interés fue planteado recientemente, por primera vez, en un protocolo de enrutamiento para MANETs [35]. Las regiones de interés son presentadas como respuesta al problema de escalabilidad que poseen de manera inherente las MANETs [8].

²En este trabajo serán usados de manera indistinta los términos de referencia, baliza y ancla.

1.6. Organización de la tesis

El trabajo de investigación que se presenta en esta tesis doctoral está organizado de la siguiente manera:

- **Capítulo 2. Antecedentes y trabajo relacionado.** El objetivo de este capítulo es proporcionar los conocimientos técnicos necesarios para entender las problemáticas que se abordan en esta tesis. Este capítulo se divide en dos secciones. La primera sección, Antecedentes, da una introducción general a las MANETs. Se definen los conceptos de redes inalámbricas, redes móviles ad hoc, enrutamiento y posicionamiento. Además se listan las características principales de las MANETs y algunos ejemplos de aplicaciones potenciales presentes y futuras. La segunda sección, Trabajo relacionado, presenta las descripciones de operación de los principales protocolos de enrutamiento *multicast* y de los algoritmos de posicionamiento más representativos reportados en artículos seminales, en el contexto de las MANETs. Por último, se presenta un resumen general del capítulo.
- **Capítulo 3. Análisis comparativo de algoritmos de posicionamiento libres de distancias para MANETs usando modelos de propagación de radio señal en 2D y 3D.** En este capítulo se presenta un estudio comparativo basado en simulaciones realistas de los algoritmos libres de distancias más representativos del estado del arte. Primeramente se describe de manera general la funcionalidad de los algoritmos en su versión 2D. Posteriormente, se presenta la ampliación de los modelos matemáticos y algoritmos para que éstos puedan operar en espacios 3D. Finalmente, se muestran los resultados de desempeño de los algoritmos evaluados con respecto a su error de localización, cobertura y sobrecarga. En el análisis experimental se consideraron escenarios con diferentes modelos de propagación de señal de radio, así como un número incremental de balizas y la movilidad de los nodos. Finalmente, se exponen las conclusiones del capítulo.
- **Capítulo 4. Método de multilateración probabilística.** La finalidad de este capítulo es presentar el método de multilateración probabilística. Este método es una propuesta novedosa que introduce este trabajo doctoral, y es empleado para estimar posición. El capítulo inicia dando la definición del método. Posteriormente, especifica el proceso matemático que emplea el método para estimar posición tanto en espacios 2D como 3D. Por último, muestra los resultados de un análisis comparativo tanto teórico como experimental entre trilateración, técnica descrita en el capítulo anterior, y multilateración probabilística, su competidor. Por último, se presentan las conclusiones del capítulo.
- **Capítulo 5. POSTAL PRIME: Protocolo de enrutamiento y posicionamiento integrado para redes móviles ad hoc.** En este capítulo se presenta POSTAL PRIME, el primer protocolo unificado de enrutamiento y posicionamiento para MANETs. El capítulo inicia dando una visión general del protocolo. Después se concentra en detallar los aspectos de diseño e implementación de los algoritmos involucrados. Enseguida, se muestran los resultados de las pruebas experimentales a las que fue sometido el protocolo. Finalmente, se muestran las conclusiones del capítulo.

- **Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro.** Este capítulo resume las conclusiones de la investigación y plantea las directivas de futuro trabajo de investigación.

Capítulo 2

Antecedentes y trabajo relacionado

2.1. Introducción

Este capítulo se divide en dos secciones. La primera sección, Antecedentes, da una introducción general a las MANETs. Se definen los conceptos de redes inalámbricas, redes móviles ad hoc, enrutamiento y posicionamiento. Además se listan las características principales de las MANETs y algunos ejemplos de aplicaciones potenciales presentes y futuras donde se puede apreciar con claridad que las MANETs representan el soporte ideal para materializarlas debido a la flexibilidad que éstas poseen. La segunda sección, Trabajo relacionado, presenta las descripciones de operación de los principales protocolos de enrutamiento *multicast* y de los algoritmos de posicionamiento más representativos reportados en artículos seminales, en el contexto de las MANETs. La idea es poder identificar y señalar aquellos mecanismos en común entre los algoritmos de enrutamiento y posicionamiento, y las deficiencias de los mismos.

2.2. Antecedentes

2.2.1. Redes móviles ad hoc (*MANETs*)

2.2.1.1. Redes inalámbricas

Una red inalámbrica se caracteriza por la interconexión de computadoras (nodos) sin la necesidad de conexión física (cableado) [13][6]. En la actualidad, estas redes tienen gran demanda debido a su bajo costo de instalación inicial. Estas redes se pueden clasificar en dos tipos: redes con infraestructura y redes libres de infraestructura. Las redes con infraestructura son aquellas en las que existe un dispositivo central (también llamado punto de acceso o enrutador) para llevar a cabo el control y monitoreo de toda la red. Este dispositivo también es responsable de desempeñar todas las funciones necesarias como el enrutamiento de paquetes del origen hasta el destino, el mantenimiento de flujo de control a través de la red, etc. Por otro lado, las redes libres de infraestructura son aquellas redes en las que no se requiere ningún dispositivo de control central y los nodos son los propios responsables de llevar a cabo la función del dispositivo de control. La Figura 2.1 muestra estos dos tipos de redes.

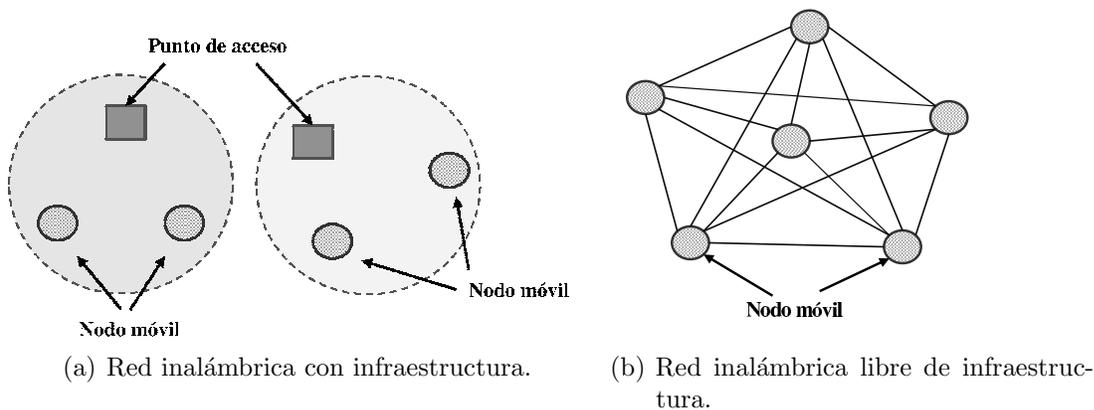


Figura 2.1: Tipos de redes inalámbricas.

Una red ad hoc [13][6] es un tipo de red inalámbrica libre de infraestructura, es decir, se caracteriza por la ausencia de cualquier tipo de infraestructura pre-existente tal como enrutadores en el caso de redes alambradas y puntos de acceso en el caso de redes inalámbricas. En este tipo de esquemas cada nodo participa en la tarea de enrutamiento mediante el envío y recepción de paquetes de datos hacia y provenientes de otros nodos. Ahora bien, debido a que los enlaces de interconexión entre los nodos de la red son inalámbricos, cualquier enlace entre par de nodos se ve influido por los recursos de los nodos y por las propiedades del enlace, por ejemplo, el ruido. Este tipo de redes se pueden clasificar, a su vez, de acuerdo a su aplicación en: redes inalámbricas de malla, redes móviles ad hoc y redes inalámbricas de sensores.

2.2.1.2. Definición

Una MANET es una colección de nodos inalámbricos que forman una estructura temporal sin la necesidad de infraestructura. Es una estructura de red autónoma compuesta por decenas o cientos de nodos que pueden moverse libremente y donde todos los nodos pueden actuar como sistemas intermedios (*routers*) o como sistemas finales (*hosts*) [13][24].

Las MANETs se caracterizan por ser flexibles y resistentes a los fallas de sus nodos ya que están diseñadas para tolerar continuos cambios topológicos y la mayoría de sus algoritmos subyacentes (MAC o enrutamiento) son totalmente distribuidos. Estas propiedades hacen que las MANETs sean el vehículo ideal para soportar una amplia clase de aplicaciones distribuidas en movimiento [44][33]. Entre estas aplicaciones se puede encontrar una creciente clase de aplicaciones ubicuas [54][23] tales como aplicaciones para la salud [3] o aplicaciones para ciudades inteligentes [16] donde la información de localización es de vital importancia. Por otra parte, existen muchos escenarios donde el GPS es impráctico debido a su costo (Por ejemplo, en redes de sensores), pero principalmente a su cobertura (Por ejemplo, el interior de un edificio) y las limitaciones de consumo de energía [26].

En la Figura 2.2 se ilustra la manera básica de operación de una red móvil ad hoc. El nodo *C* se puede comunicar directamente en un salto con los nodos *A*, *E* y *D*. Por otro lado,

para que el nodo C pueda comunicarse con el nodo B , el nodo E (puede ser también A o D) debe actuar como intermediario entre C y B , transmitiendo información entre ellos. Por lo tanto, la información que fluye entre los nodos C y B se basa en una comunicación de múltiples saltos.

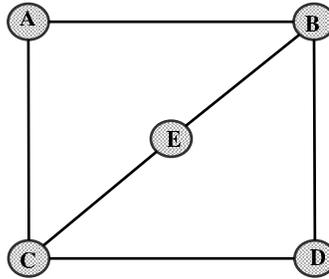


Figura 2.2: Ejemplo de una red móvil ad hoc.

2.2.1.3. Características

Debido a que las MANETs se pueden construir espontáneamente sin necesidad de una infraestructura existente, estas redes presentan restricciones especiales que se deben considerar para el diseño de soluciones de enrutamiento robustas y eficientes. Las principales características de las MANETs son:

- **Topología dinámica.** En una MANET, los nodos son libres de moverse arbitrariamente. Por lo tanto, la topología (la cual es típicamente multisalto) puede cambiar rápida y aleatoriamente en tiempos impredecibles. Este comportamiento dinámico dificulta el establecimiento de la conectividad en la red, la cual se debe mantener para permitir que los servicios de comunicación operen sin interrupciones. Este aspecto es de gran influencia para el diseño de los protocolos de enrutamiento.
- **Operación distribuida.** En una MANET no existe infraestructura para el control central de las operaciones de la red. En lugar de eso, el control de la red se distribuye entre los nodos. Los nodos involucrados en una MANET deben cooperar entre sí y comunicarse, y cada nodo debe actuar como retransmisor cuando se requieran implementar funciones específicas, tales como enrutamiento y seguridad.
- **Fluctuación de los enlaces.** La tasa de error de bits es más significativo en una MANET de múltiples saltos, ya que el agregado de todos los errores en los enlaces afecta significativamente la calidad de la información recibida.
- **Operación de energía limitada.** Los nodos en una MANET requieren de una batería para obtener la energía que asegure su funcionamiento. Por lo tanto, la energía es uno de los recursos que se busca optimizar con el fin de extender su uso.

Aplicaciones	Descripciones/Servicios
Redes tácticas	Comunicación militar y operaciones militares.
Redes de sensores	Aplicaciones para casas: sensores y actuadores que permiten a los usuarios controlar y administrar dispositivos de manera local y remota.
Servicios de emergencia	Operaciones de búsqueda y rescate, recuperación de datos de pacientes (registro, estado, diagnóstico) y sustitución de infraestructura fija en caso de terremotos, huracanes, incendios, etc.
Ambientes comerciales	Comercio electrónico como es el caso del pago electrónico desde cualquier lugar, por ejemplo, el pago del servicio de taxi.
Aplicaciones educativas	Configuración de salones de clases virtuales y/o salones de conferencias.
Entretenimiento	Juegos multiusuario.
Servicios basados en localización	Información de servicios y servicios de seguimiento, por ejemplo, reenvío automático de llamadas.

Tabla 2.1: Aplicaciones de MANETs.

2.2.1.4. Aplicaciones

Inicialmente las aplicaciones y los desarrollos de MANETs fueron exclusivamente orientados para uso militar, sin embargo, la introducción de tecnologías como IEEE 802.11 [11], Bluetooth [9], NFC [17], RFID [48] e Hyperlan [19] facilitan mucho actualmente el desarrollo ad hoc fuera del dominio militar. A partir de esto, se han empezado a modelar aplicaciones ad hoc principalmente en campos especializados como servicios de emergencia, monitoreo ambiental y recuperación de desastres. No obstante, debido a la flexibilidad que poseen este tipo de redes, éstas son atractivas para varios escenarios, por ejemplo, redes de área personal, operaciones de búsqueda y rescate, aplicaciones comerciales y educativas, redes de sensores [24][36][6], etc. En la Tabla 2.1 se presenta un breve resumen de algunas aplicaciones potenciales actuales y futuras donde se pueden utilizar las MANETs como infraestructura de red.

2.2.2. Enrutamiento en MANETs

2.2.2.1. Definición

Enrutamiento se define como la manera de seleccionar una ruta o camino en la red a través del cual los paquetes se moverán desde su fuente hasta el destino [6][2]. En una red con infraestructura, el dispositivo que lleva a cabo el control central es el encargado de almacenar todas las rutas de diferentes fuentes a diferentes destinos. No obstante, en MANETs cada nodo móvil es el encargado de mantener la ruta del origen al destino.

2.2.2.2. Tipos de enrutamiento

En el estado del arte se presentan algunas clasificaciones de los algoritmos de enrutamiento [34][32][5]. Este trabajo presenta la clasificación de acuerdo a la manera en que estos algoritmos llevan a cabo el proceso de difusión de información. De acuerdo a esto, los algoritmos se clasifican en: *unicast*, *multicast*, *geocast* y *broadcast*. El modo más básico de operación es *broadcast*[7]. En este modo; cada mensaje transmitido sobre el canal inalámbrico generalmente es recibido por todos los nodos que se encuentran dentro del uno-vecindario del nodo emisor. La implementación más simple del *broadcast* se conoce como inundación (*flooding*) [57]. La difusión *unicast* significa comunicación uno a uno, es decir, una fuente transmite paquetes de datos a un único destino [34]. Algunos ejemplos de protocolos *unicast* son: AODV [12], OLSR [14], DSDV [40], DSR [29], TORA [39], etc. Por otro lado están los protocolos de enrutamiento *multicast*, que son requeridos cuando un nodo necesita enviar un mismo mensaje o flujo de datos a múltiples nodos destino [5]. Ejemplos de este tipo de difusión son los protocolos CAMP [39], ODMRP [61], MAODV [45], AMRIS [58], etc. Por último, existe un caso especial de *multicast* llamado *geocast* que es usado para deliverar paquetes de datos a un grupo de nodos situados dentro de una zona geográfica específica. Con respecto a enrutamiento *geocast* los protocolos que más destacan son LBM [31] y ZHLS [28].

2.2.3. Posicionamiento en MANETs

2.2.3.1. Definición

Posicionamiento se define como el proceso por medio del cual se encuentra o se estima la posición de un nodo móvil o punto de interés en un espacio 2D o 3D dentro de un sistema de coordenadas construido utilizando algunas referencias conocidas [36].

2.2.3.2. Técnicas de localización

Según la literatura, el proceso de posicionamiento se divide generalmente en tres etapas: *estimación de distancia/ángulo*, *estimación de posición* y *algoritmo de localización*. Entonces, en base a esta organización, a continuación se especifican las técnicas de localización más destacadas en el estado del arte.

- **Estimación de distancia/ángulo.** Esta etapa es la responsable de estimar distancias y/o ángulos entre dos nodos. Para alcanzar su objetivo, esta etapa emplea alguna de las técnicas que se describen a continuación. Entre las técnicas más sobresalientes están: Ángulo de Llegada (AoA) [36][47], Tiempo de Llegada (ToA) [36][47], Diferencia de Tiempo de Llegada (TDoA) [36][47], Indicador de la Intensidad de la Señal Recibida (RSSI) [56] y técnica basada en número de saltos (HopCount) [36].
 - **Ángulo de llegada (AoA).** Este método emplea un arreglo multiantena. Cada antena que se utiliza conoce a priori su posición. Cuando un nodo móvil se encuentra en línea de vista de una antena, éste le envía una señal a la antena.

Con la información recibida, la antena se encargará de determinar de qué dirección proviene dicha señal. Entonces, mide el ángulo con el que llega la señal para determinar una posición preliminar. Para obtener una buena precisión, un nodo móvil necesita la lectura de al menos dos antenas. Por último, las antenas envían la información a un equipo central que se encargará de determinar la posición por métodos trigonométricos usando las coordenadas de las antenas que recibieron la señal del nodo móvil y que envían los datos a dicho equipo central. La posición del nodo móvil corresponde, como se visualiza en la Figura 2.3, con el punto de intersección de las señales que llegan a las dos antenas. Este método se considera impráctico debido a la necesidad de tener que contar con un gran arreglo de antenas para estimar la posición de nodos móviles con buena precisión. Asimismo, la precisión de esta técnica se reduce con el desvanecimiento de la señal y efectos multitrayectoria.

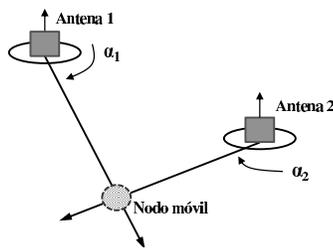


Figura 2.3: Método Ángulo de Llegada (AoA).

- **Tiempo de Llegada (ToA).** Este método se basa en la medida de tiempo de llegada de la señal transmitida por un nodo móvil a diferentes estaciones base. Una de las posibilidades es medir el tiempo que le toma a la señal hacer un viaje de ida y vuelta. La distancia se calcula considerando el tiempo que se tarda en llegar la señal desde un nodo móvil hasta la estación base a la velocidad de la luz. Para estimar posición, este método necesita al menos tres antenas que midan el tiempo de viaje de la señal; el tiempo se emplea como parámetro que permite calcular la distancia que existe entre el nodo móvil y las antenas (Ver Figura 2.4). Cuando ya se conocen distancias al menos hacia tres antenas, se emplea el método trigonométrico llamado trilateración para estimar la posición de un nodo móvil.

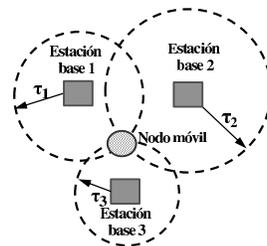


Figura 2.4: Método Tiempo de Llegada (ToA).

- **Diferencia de Tiempo de Llegada (TDoA).** Esta técnica emplea las distancias a los emisores obtenidas de forma relativa (diferencia entre unas señales y otras). Las ondas de los diferentes emisores llegan al nodo móvil (receptor) con una diferencia de tiempo en función de las distancias del nodo móvil respecto a los emisores de las mismas. Así, el nodo móvil, tras identificar los emisores que generan las señales, sólo tiene que medir el tiempo que ha transcurrido entre la llegada de cada una de las diferentes señales y calcular los puntos que cumplen la diferencia de tiempo obtenida. De este modo se genera, por cada diferencia de tiempos tomada, una hipérbola. Finalmente, la posición de un nodo móvil, se basa en el cálculo de la intersección de todas las hipérbolas, ver Figura 2.5.

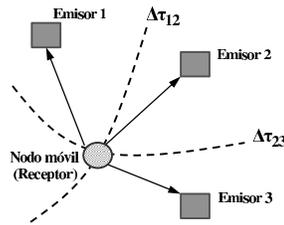


Figura 2.5: Método Diferencia de Tiempo de Llegada (TDoA).

- **Intensidad de la Señal Recibida (RSSI).** Esta técnica se basa en las ecuaciones de pérdidas de propagación. Cuando se conoce la potencia de transmisión de emisor, y se mide la potencia recibida en una antena, se pueden estimar las distancias entre ambos en función de la diferencia que existe entre los dos valores de potencia (Ver Figura 2.6). Esta técnica se ve afectada por el entorno ya que tanto el desvanecimiento como los efectos multitrayectoria y la absorción provocada por diferentes materiales disminuyen la potencia transmitida, traduciéndose esto en errores de cálculo de la distancia.

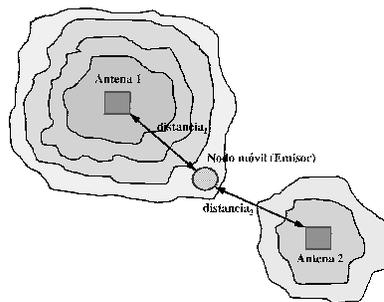


Figura 2.6: Método Intensidad de la Señal Recibida (RSSI).

- **Conteo de salto (Hop Count).** Esta técnica se basa en la distancia, medida en número de saltos, entre el nodo móvil (receptor) y antenas (emisores). El nodo móvil escoge en cada momento la ruta más corta, es decir, el camino que tiene el menos número de saltos para alcanzar cada antena (Ver Figura 2.7). Aún cuando esta técnica es sencilla de implementar, no se considera

adecuada para redes inalámbricas, ya que la elección del camino más corto no necesariamente implica ser el mejor camino o el más rápido puesto que únicamente toma en cuenta el número de saltos obviando otros criterios importantes como la calidad del enlace.

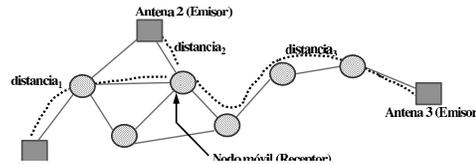


Figura 2.7: Método Conteo de Salto (Hop Count).

- **Estimación de posición.** Esta etapa es la encargada de calcular la posición del nodo en base a la información disponible referente a distancias/ángulos y las posiciones de nodos referencia. Los métodos que más se destacan en la literatura son los que se describen a continuación.
 - **Triangulación.** Es un método que se emplea para determinar la posición de un nodo móvil o punto de interés. El proceso que sigue para estimar tal posición es como se describe a continuación. Un nodo que desconoce su posición estima su ángulo (dirección) a cada uno de los tres nodos referencia. Entonces, en base a los ángulos y posiciones de los nodos referencia (los cuales forman un triángulo), el nodo móvil estima su posición usando simples relaciones de trigonometría, leyes de senos y cosenos (Ver Figura 2.8).

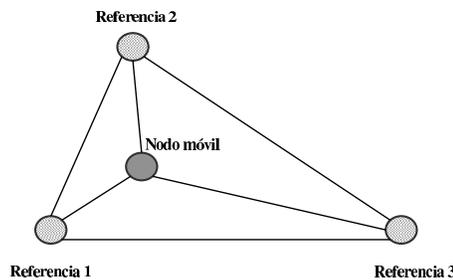


Figura 2.8: Método Triangulación.

- **Trilateración.** Es un método para determinar la posición relativa de nodos móviles u objetos usando la geometría de triángulos, similar al método de triangulación previamente descrito. Para estimar posición a través de trilateración, un nodo móvil requiere conocer la posición de tres nodos referencia (cuatro para espacios tridimensionales) y las distancias a cada uno de los nodos referencia. La representación geométrica de trilateración es ilustrada en la Figura 2.9. Si las distancias $distancia_1, distancia_2$ y $distancia_3$ son exactas, la posición del nodo móvil se determinará como el punto de

intersección de los tres círculos. Si las distancias son imprecisas, entonces el nodo estará posicionado dentro de la región de intersección de los tres círculos.

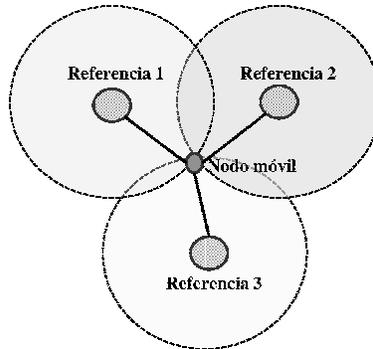


Figura 2.9: Método Trilateración.

- **Multilateración.** El método de multilateración también conocido como posicionamiento hiperbólico, es una técnica que emplea la magnitud TDoA para estimar posición tridimensional de un nodo móvil mediante un mínimo de cuatro nodos referencia (antenas). Conociendo la posición de dos referencias y el TDoA de una señal proveniente del nodo móvil a localizar, el problema de búsqueda se reduce a localizar al nodo móvil en el interior de un hiperboloide de dos hojas.
- **Algoritmo de localización.** Este es el principal componente de cualquier sistema de localización. Éste determina cómo será manipulada la información disponible con el fin de permitir a los nodos móviles, estimar sus posiciones. Generalmente la literatura los clasifica como: Centralizado vs Distribuido, Basado en distancias vs Libre de distancias y Basado en nodos referencia vs Libre de nodos referencia.
 - **Centralizado vs Distribuido.** En algoritmos centralizados, los nodos móviles envían datos a una estación central. La estación central realiza el cómputo necesario para estimar la posición de cada nodo y posteriormente devuelve las posiciones a cada uno de ellos. La ventaja de este tipo de esquemas es que elimina el problema de procesamiento en cada nodo. Sin embargo, al mismo tiempo las limitaciones radican en el costo de comunicación que se genera entre los nodos móviles y la estación central. Este alto costo de comunicación y retardo intrínseco hacen que un algoritmo centralizado sea considerado ineficiente en redes de larga escala debido a que, en la mayoría de los casos, el costo de comunicación aumentan en la medida en la que el número de nodos en la red aumenta. En relación a un algoritmo distribuido, éste distribuye la carga computacional en toda la red para disminuir y reducir al mínimo la cantidad de comunicación entre los nodos de la red. Cada nodo móvil determina su posición a través de la comunicación con sus nodos vecinos. En

general, este tipo de esquemas son más robustos y eficientes, ya que cada nodo móvil determina su propia posición localmente con la ayuda de sus vecinos, sin la necesidad de enviar y recibir información de localización hacia y desde una estación central. No obstante, este tipo de algoritmos es más difícil de implementar, y a veces puede no ser posible debido a la limitada capacidad computacional que pueden llegar a tener los nodos móviles.

- **Basado en Distancias vs Libre de Distancias.** La técnica basada en distancias requiere información de rango de transmisión que se puede utilizar para estimar la distancia entre dos nodos móviles vecinos con la finalidad de estimar la posición de los mismos. En este esquema, la posición de un nodo móvil se calcula en relación con otros nodos móviles en su vecindad. Así mismo, parte del supuesto de que la distancia absoluta entre un emisor y un receptor puede ser estimada por una o más características de la señal de comunicación desde el emisor hasta el receptor. Sin embargo, la precisión tal estimación, está sujeta al medio de transmisión y medio ambiente que le rodea. Esta técnica por lo regular depende de hardware adicional complejo que no es factible para MANETs debido a que los nodos móviles generalmente poseen recursos limitados. En relación a la técnica libre de distancias, ésta usa información de conectividad ente nodos móviles vecinos para estimar la posición de los nodos. Esta técnica no requiere de hardware adicional y emplea información de proximidad para estimar la posición de los nodos móviles, y por lo tanto tienen mala precisión. Ahora bien, debido a que esta técnica nunca intenta estimar la distancia entre dos nodos móviles usando intensidad de la señal recibida o alguna otra característica de la señal de comunicación recibida, simplifica en gran medida el diseño del hardware. Entonces, por lo antes mencionado, esta técnica se considera como una alternativa atractiva para MANETs desde el punto de vista costo-efectividad.
- **Basado en Nodos Referencia vs Libres de Nodos Referencia.** Un algoritmo basado en nodos referencia (o balizas) requiere una fracción mínima de nodos referencia para que los resultados que se produzcan sean adecuados. En el caso de espacios 2D se requiere de al menos tres nodos referencia no colineales, mientras que en espacios 3D se requieren al menos cuatro nodos referencia no coplanares. Un inconveniente de este tipo de algoritmos es que se requiere de otro sistema de posicionamiento para determinar las posiciones de los nodos referencia. Por lo tanto, si otro sistema de posicionamiento no está disponible, por ejemplo, para nodos referencia basados en GPS situados en zonas donde no hay visión clara del cielo, el algoritmo puede no funcionar correctamente. Otro inconveniente es que los nodos referencia, por lo general, requieren un receptor GPS para ser montado en ellos. Esto resulta ser costoso y poco rentable debido a que estos algoritmos requieren un número elevado de nodos referencia para estimar posición con relativamente buena precisión. En lo que respecta a un algoritmo libre de nodos referencia, como su nombre

lo indica, éste no requiere el uso de nodos referencia. Este tipo de algoritmos proporciona sólo posiciones relativas de nodos móviles. Para algunas aplicaciones, tales coordenadas relativas son suficiente. Por ejemplo, en protocolos de enrutamiento geográfico, el siguiente nodo de transmisión suele ser elegido en base a la distancia, que requiere que el siguiente salto esté físicamente más cerca del destino, criterio que puede ser evaluado mediante coordenadas relativas.

2.2.3.3. Aplicaciones

Las aplicaciones o sistemas conscientes del contexto así como algunos de los principales servicios de red, son dos de las áreas donde se puede observar la importancia y trascendencia del uso de los sistemas de posicionamiento [23][20][33][36][43][6].

- **Aplicaciones conscientes del contexto.** En este tipo de aplicaciones, la localización juega un papel fundamental. Los algoritmos y técnicas que permiten a una aplicación estar consciente de su posición se han convertido en un prerrequisito para muchas de estas aplicaciones. Por ejemplo, localizar un objeto o usuario en un mapa o simplemente obtener la localización física o simbólica de éstos, etc. A continuación se describen brevemente algunos de los ejemplos de uso de localización en este tipo de aplicaciones.
 - **Rastreo.** La información de localización obtenida mediante tecnologías de radiofrecuencia se utiliza en aplicaciones tanto civiles como militares para rastrear tanto objetos como personas.
 - **Visitas guiadas.** En aplicaciones de esta naturaleza, los sistemas móviles pueden desplegar diverso tipo de información en su dispositivo basándose en la ubicación actual de los usuarios.
 - **Desvío de llamadas.** Este tipo de aplicaciones teniendo consciencia de la localización del usuario puede redireccionar automáticamente llamadas a la ubicación actual del mismo.
 - **Robótica.** Al equipar los robots con tecnologías RFID y teniendo aplicaciones que puedan determinar la ubicación de éstos, se pueden explorar ambientes poco familiares y/o zonas de desastre donde es difícil que el hombre pueda acceder.
- **Servicios de red.** La segunda clase de aplicaciones de los sistemas de posicionamiento incluye enrutamiento, control de topología y geocasting, entre los servicios que más destacan.
 - **Enrutamiento.** Este proceso consiste en la selección de rutas a lo largo de la red para el envío de la información. Muchos de los protocolos de las redes inalámbricas multisalto utilizan localización para construir tablas de información de envío y entrega de mensajes. Este esquema puede mejorar el proceso de ruteo, entre otras, haciéndolo escalable.

- **Control de topología.** El control de topología es una de las técnicas más importantes usada en MANETs, entre otras cosas, para el ahorro de energía. La información de localización como conocimiento a priori puede ser aplicada al control de topología empleando técnicas de geometría.
- **Geocasting.** Esta técnica consiste en el envío de mensajes a una determinada región. Algunas propuestas que involucran la información actual de Internet con direcciones geográficas para, por ejemplo, enviar mensajes de advertencia a zonas de riesgo de una catástrofe natural utilizando únicamente información geográfica.

2.3. Trabajo relacionado

2.3.1. Enrutamiento

En esta sección se presenta la manera de como operan los protocolos de enrutamiento *multicast* y los algoritmos de posicionamiento más representativos del estado del arte en el conexto de las MANETs.

2.3.1.1. On-Demand Multicast Routing Protocol (ODMRP)

ODMRP [61] es un protocolo de enrutamiento *multicast* iniciado por el transmisor. Este protocolo introduce el concepto de grupo de envío (*Forwarding Group*), donde únicamente a un subconjunto de nodos de la red se transmiten paquetes *multicast*. Cuando fuentes *multicast* tienen datos que enviar pero no tienen información de enrutamiento o membresía al grupo *multicast*, éstos inundan la red con un paquete llamado *JOIN DATA*. Cuando un nodo recibe un paquete *JOIN DATA* (no duplicado), almacena el ID del nodo y posteriormente retransmite el paquete. Cuando un paquete *JOIN DATA* llega a un receptor *multicast*, el receptor crea un paquete *JOIN TABLE* y lo transmite a sus nodos vecinos. Cuando un nodo recibe un paquete *JOINT TABLE* verifica si su ID coincide con algunas de las entradas de esta tabla. Si encuentra una coincidencia, quiere decir que el nodo forma parte de la ruta hacia la fuente, y por lo tanto forma parte del grupo de envío. Posteriormente, este nodo transmite su propio paquete *JOIN TABLE* creado sobre las entradas coincidentes. El paquete *JOIN TABLE* es propagado por cada miembro del grupo de envío hasta llegar a la fuente *multicast* a través de la ruta más corta. La Figura 2.10 ilustra el proceso de unión al grupo *multicast*. Este proceso construye (o actualiza) las rutas que van desde las fuentes hasta los receptores y construye una malla de nodos lo cuales conforman el grupo de envío. Las fuentes *multicast* son las encargadas de actualizar periódicamente tanto la información de membresía como las rutas mediante el envío de paquetes *JOIN DATA*. En ODMRP no se requiere de ningún mensaje de control explícito para dejar el grupo. Cualquier nodo que quiera dejar el grupo sólo deja de enviar paquetes *JOIN DATA* o si únicamente quiere dejar de recibir datos del grupo *multicast*, deja de enviar el paquete *JREP*. La principal desventaja de ODMRP es su alta sobrecarga de control mientras mantiene actualizados los grupos de envío y cuando se mantiene inundada toda la red con solicitudes. Este problema se puede mitigar mediante el mantenimiento preventivo de rutas, como lo sugieren en [59]. Otra desventaja es que el mismo paquete de datos puede

ser propagado a través de múltiples rutas formadas hacia un destino (paquetes duplicados), lo que reduce la eficiencia del protocolo. Asimismo, ODMRP tiene un problema de escalabilidad. Por último, aún cuando las fuentes no estén interesadas en recibir paquetes *multicast* deben formar parte de la malla del grupo *multicast*.

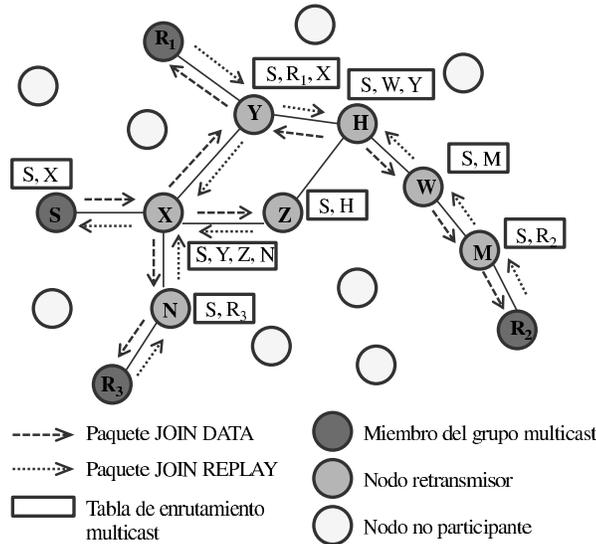


Figura 2.10: Proceso de unión en ODMRP.

2.3.1.2. Protocol for Unified Multicasting through Announcements (PUMA)

El protocolo PUMA [52] establece y mantiene una malla compartida por cada grupo *multicast*. Esta característica elimina la necesidad de un protocolo de enrutamiento *unicast* o la preasignación de núcleos a grupos *multicast*, ya que éste hace uso de núcleos dinámicos. PUMA emplea el enfoque de “iniciada por el receptor”, en el que todos los receptores se unen al grupo *multicast* utilizando la dirección del nodo núcleo, sin la necesidad de inundar toda la red con paquetes de control o con paquetes de datos provenientes de todas las fuentes de un grupo. EL protocolo PUMA elige el primer receptor del grupo como el núcleo del grupo e informa a cada nodo en la red, o al menos a su siguiente salto, del núcleo elegido de cada grupo. El núcleo de un grupo transmite anuncios *multicast* periódicamente para ese grupo. A medida que los anuncios *multicast* viajan a través de la red, se establece una lista de conectividad para cada nodo de la red. La Figura 2.11 ilustra la propagación de anuncios *multicast* y la construcción de listas de conectividad. Los nodos emplean las listas de conectividad para establecer una malla y enrutar paquetes de datos desde las fuentes hasta los receptores. Cada receptor se conecta al núcleo elegido a través de todos los caminos más cortos entre el receptor y el núcleo. Cuando un receptor desea unirse a un grupo *multicast*, primero verifica si ha recibido un anuncio previamente de ese grupo. Si el nodo conoce el núcleo, comienza a transmitir anuncios *multicast* y especifica el mismo núcleo para el grupo. De lo contrario, se considera así mismo como el núcleo de grupo y comienza la transmisión periódica de anuncios *multicast* a sus vecinos, señalándose como núcleo del grupo. Cuando un nodo desea enviar datos a un grupo, reenvía los paquetes de

datos hacia el nodo desde el que ha recibido el mejor anuncio *multicast* (el nodo con el ID mayor). Un nodo envía un paquete de datos *multicast* que recibe de su vecino si el padre del vecino es el propio nodo. Por lo tanto, los paquetes de datos *multicast* se mueven salto a salto hasta que llegan a los miembros de la malla. Los miembros del grupo *multicast* emplean una caché de IDs de paquetes para detectar y descartar paquetes duplicados que son inundados dentro de la malla. De manera similar a otros protocolos *multicast*, PUMA tiene que reciclar los números de secuencia y controlar los errores que causa un núcleo para restablecer el número de secuencia asignando al grupo. El número de secuencia de un anuncio *multicast* sólo puede ser incrementado por el núcleo del grupo. PUMA minimiza la sobrecarga de paquetes de datos usando únicamente un nodo, es decir, el núcleo que es quien inunda la red. Además, se concentra en la redundancia de malla en la región donde están los receptores e incluye todos los caminos más cortos existentes entre los receptores y el núcleo, el cual es también un receptor.

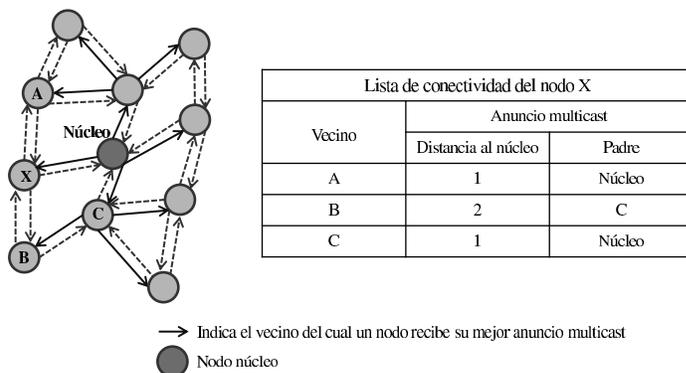
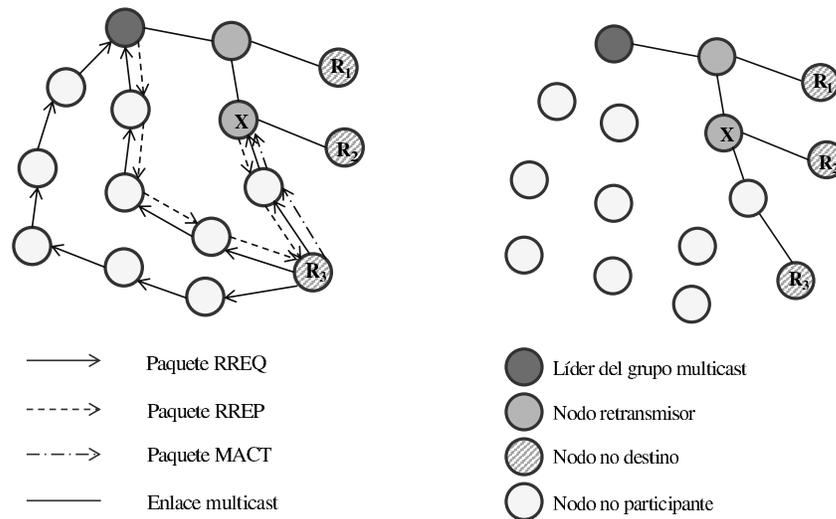


Figura 2.11: Propagación de anuncios *multicast* en PUMA.

2.3.1.3. Multicast Ad Hoc On-Demand Distance Vector (MAODV)

El protocolo MAODV [45] es una extensión de AODV [12]. Este protocolo mantiene un árbol compartido por cada grupo *multicast*, el cual consiste sólo de receptores y retransmisores. Se determina una ruta *multicast* bajo demanda usando un mecanismo de descubrimiento de ruta. El primer miembro del grupo *multicast* es el que se convierte en el líder de ese grupo. El líder del grupo *multicast* es el responsable de mantener el número de secuencia del grupo *multicast* y de difundir ese número al grupo. Esto se lleva a cabo mediante un mensaje *HELLO*. Los nodos utilizan la información del mensaje *HELLO* para actualizar su tabla de solicitud (*Request Table*). En la Figura 2.12(a), si el nodo R_3 quiere unirse a un grupo *multicast*, origina un paquete de solicitud de ruta (*RREQ*) y lo transmite vía *unicast*, si tiene la dirección del líder del grupo. Si se desconoce la dirección del líder del grupo, entonces R_3 transmite vía *broadcast* el paquete *RREQ*, tal como se representa en la Figura 2.12(a). Sólo el líder de un grupo o un miembro del grupo *multicast* con un número de secuencia mayor al que se indica en el paquete *RREQ* puede responder a un paquete *RREQ*. Cuando el líder o un miembro del grupo *multicast* recibe múltiples *RREQ*, éste selecciona el paquete con el número de secuencia más alto y con la distancia en saltos más

baja, y a través de una ruta *unicast* responde al nodo solicitante con un paquete *RREP*, ver Figura 2.12(a). El paquete *RREP* contiene la distancia en saltos al líder del grupo y el número de secuencia actual del grupo *multicast*. Cuando el nodo receptor recibe más de un paquete *RREP*, éste selecciona el más reciente y el que contiene la ruta más corta. Después, envía un mensaje de activación *multicast* *MACT* a su siguiente salto para habilitar esa ruta. La Figura 2.12(b) muestra el árbol *multicast* una vez terminado el proceso de unión. Si un nodo que no es hoja del árbol desea dejar el grupo *multicast*, éste envía un mensaje de activación *multicast* a su siguiente salto con su bandera *depurar* activa; de lo contrario debe permanecer en el árbol. MAODV emplea una búsqueda de extensión de anillo (*ERS*) para mantener el árbol *multicast*. Cuando se detecta la existencia de un enlace roto entre dos nodos, el nodo descendente es el responsable de iniciar la reparación del enlace. El nodo descendente envía vía *broadcast* un paquete *RREQ* utilizando una *ERS*, y sólo puede responder un nodo que tenga un número de saltos al líder del grupo de menor valor o de igual valor al indicado en el paquete *RREQ*. Si el nodo descendente no recibe una respuesta, éste se da cuenta que el árbol *multicast* se divide. Entonces, el nodo descendente se convierte en el líder del nuevo grupo *multicast* por su participación en la partición del árbol *multicast*. El árbol *multicast* permanece particionado hasta que las dos partes de la red se conectan de nuevo. Los principales inconvenientes de MAODV son las largas demoras y los altas sobrecargas asociadas al proceso de reparación de los enlaces rotos en condiciones de alta movilidad y a la carga de tráfico. Además, tiene baja relación de entrega (*Delivery Ratio*) en escenarios con alta movilidad, gran cantidad de miembros o alta carga de tráfico. MAODV no es flexible porque depende de AODV. Por último, se sufre de un único punto de falla, que es el líder del grupo *multicast*.



(a) Proceso de unión del nodo R_3 al grupo *multicast*. (b) El árbol *multicast* al final del proceso de unión.

Figura 2.12: Proceso de establecimiento del árbol *multicast* en MAODV.

2.3.1.4. An Interest-Driven Approach to Integrated Unicast and Multicast Routing in MANETs (PRIME)

El protocolo PRIME [35] establece y mantiene una malla de enrutamiento por cada grupo *multicast* activo, es decir, por cada grupo con fuentes y receptores, y por cada destino *unicast* con al menos una fuente activa. La primera fuente que se vuelve activa para un destino *unicast* o *multicast* envía su primer paquete de datos adjunto en un paquete de solicitud de malla (*Mesh Request, MR*) que se disemina hasta un horizonte con un umbral predefinido. Si el interés expresado por la fuente se extiende a más de un paquete de datos, el receptor del *MR* establecerá y mantendrá una malla de enrutamiento que abarcará las fuentes activas y el destino (un único nodo si se trata de tráfico *unicast* y de un conjunto de nodos en el caso de flujo *multicast*). En el caso de un flujo *multicast*, los receptores del grupo *multicast* ejecutan un algoritmo de elección distribuido usando paquetes anuncio de malla (*Mesh Announcement, MA*) para elegir el núcleo del grupo (*core*), el cual es el único receptor del grupo que continúa generando *MAs* para el grupo. Para un destino *unicast* no es necesario esta elección. Un núcleo o destino *unicast* elegido continúa enviando *MAs* con números de secuencia que crecen monótonamente durante el tiempo en el que hay al menos una fuente activa interesada en él. Cuando no se detectan fuentes activas para un flujo, el destino o núcleo del flujo detiene la generación de *MAs*, lo que provoca que la información de enrutamiento correspondiente a la malla del flujo sea eliminada. Para ahorrar ancho de banda, los *MAs* de los flujos *unicast* y *multicast* son agrupados de manera oportunista en paquetes de señalización. Por otra parte, para confinar el tráfico de control únicamente en aquellas partes de la red que se requiera la información, PRIME define una región de interés por cada malla establecida. La región de interés de un flujo es un componente conectado de la red que abarca todos los receptores, las fuentes del flujo y nodos retransmisores necesarios para conectarlos. En la Figura 2.13 se ilustran regiones de interés de flujos *unicast* y *multicast*. Los *MAs* para un determinado flujo son enviados con mayor frecuencia dentro de las regiones de interés que fuera de éstas, y dependiendo del tipo de flujo (por ejemplo, *unicast* bidireccional o *multicast*) puede ser que los *MAs* no se propaguen fuera de las regiones de interés.

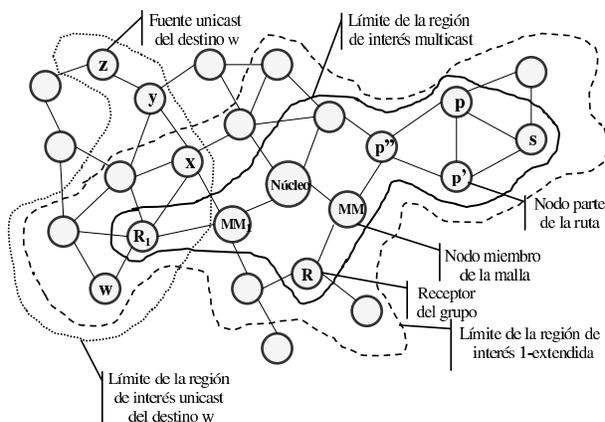


Figura 2.13: Ejemplos de una región de interés *multicast*, su región de interés 1-extendida asociada y la región de interés de un flujo *unicast*.

2.3.2. Posicionamiento

2.3.2.1. DV-Hop

El algoritmo DV-Hop [38] lleva a cabo el proceso de estimación de posición en tres etapas. En la primera etapa, DV-Hop emplea el mecanismo clásico vector de distancia mediante el cual todos los nodos en la red consiguen determinar sus distancias, en saltos, hacia las balizas. En esta etapa, cada nodo mantiene una tabla $\{X_i, Y_i, h_i\}$ e intercambia actualizaciones únicamente con sus nodos vecinos. En la segunda etapa, cada baliza, después de acumular distancias hacia otras balizas, estima el tamaño promedio para un salto (corrección) y difunde el valor resultante a los nodos de su vecindario. Una baliza calcula su corrección mediante la Ecuación 2.1. Al recibir una corrección, un nodo arbitrario calcula sus distancias euclidianas hacia las balizas. Con esta información como entrada, en una tercera etapa, el nodo emplea el método de trilateración para estimar su posición.

$$c_i = \frac{\sum \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2}}{\sum h_i} \quad (2.1)$$

Ejemplo

En el ejemplo de la Figura 2.14, los nodos B_1 , B_2 y B_3 representan balizas. La baliza B_1 tiene $100m$ como distancia euclidiana hacia B_2 y $40m$ hacia la baliza B_3 . Asimismo, sus distancias en saltos son 2 y 6 respectivamente. La baliza B_1 calcula la corrección $(100 + 40)/(2 + 6) = 17.5$, valor que en realidad representa el tamaño promedio (en metros) de un salto, y posteriormente propaga el valor resultante a través de la red. De manera similar, B_2 calcula una corrección de $(40 + 75)/(2 + 5) = 16.42$ y B_3 de $(75 + 100)/(6 + 5) = 15.90$. Un nodo regular recibe actualización de una de las balizas, generalmente la que se encuentra a una distancia en saltos más corta. En DV-Hop, las correcciones se distribuyen mediante un proceso de inundación controlada, es decir, que después que un nodo recibe y retransmite una corrección, éste elimina todas las correcciones subsecuentes. Esta política asegura que la mayor parte de los nodos reciba sólo una corrección, la corrección de la baliza que tiene la distancia en saltos más corta. Cuando se habla de redes a gran escala, DV-Hop propone reducir la señalización mediante el establecimiento de un TTL (*Time To Live*) en los paquetes que se propagan, esto con el fin de limitar el número de balizas disponibles para un nodo.

Así, el proceso de inundación controlada ayuda a mantener las correcciones de las balizas únicamente en sus vecindarios. En el ejemplo anterior, se asume que el nodo N recibe la corrección de la baliza B_2 . Por lo tanto, las distancias estimadas de N hacia las tres balizas son: a B_1 - $3 * 16.42$, a B_2 - $2 * 16.42$, y a B_3 - $3 * 16.42$. Entonces, N introduce los valores resultantes en el método de trilateración mediante el cual, finalmente, estima su posición.

El algoritmo DV-Hop se caracteriza por su simplicidad y por no emplear técnicas de medición de potencia de la señal, por ende no acarrea los errores derivados de éstas. Sin embargo, tiene como principal desventaja el hecho de estar diseñado para operar en redes isotrópicas, es decir, cuando las propiedades del grafo son las mismas en todas direcciones,

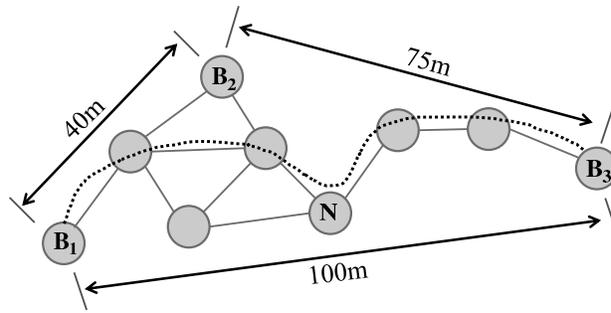


Figura 2.14: Ejemplo de corrección de una baliza en DV-Hop.

donde las correcciones que se calculan razonablemente son las que se emplean para estimar las distancias entre saltos.

2.3.2.2. Amorphous

Amorphous [37] es un algoritmo que sigue un proceso bastante parecido al del algoritmo DV-Hop. El proceso de estimación de posición de nodos se lleva a cabo también en tres etapas. En la primera etapa las balizas propagan información de localización a través de la red. Mientras se propaga dicha información, los nodos en la red consiguen estimar sus distancias en saltos hacia las balizas. Enseguida, los nodos intercambian las distancias estimadas con sus nodos vecinos. De esta manera, y restando 0.5 (mitad del radio) para compensar el error causado por una baja resolución, los nodos estiman un promedio local de las distancias en saltos hacia cada baliza. La Ecuación 2.2 expresa matemáticamente dicha estimación. El algoritmo Amorphous también emplea el concepto de longitud de un salto. No obstante, el enfoque para calcular dicho valor es completamente diferente al empleado por DV-Hop. En Amorphous se asume que se conoce de antemano la densidad de la red n_{local} . Por lo tanto, el valor promedio de longitud de un salto se calcula fuera de línea de acuerdo a la Ecuación 2.3 de Kleinrock y Silvester [30]. En la tercera y última etapa, una vez estimadas las distancias euclidianas hacia cada baliza, un nodo arbitrario emplea el método de trilateración para estimar su posición.

$$d_{prom} = \frac{\sum_{j \in vecinos(i)} ds_j + ds_i}{|vecinos(i)| + 1} - 0.5 \quad (2.2)$$

$$LS_{prom} = r(1 + e^{-n_{local}} - \int_{-1}^1 e^{\frac{-n_{local}}{\pi} (\arccost-t\sqrt{1-t^2})} dt) \quad (2.3)$$

Ejemplo

En el ejemplo de las Figuras 2.15(a)-2.15(d), los nodos B_1 , B_2 y B_3 representan balizas, el nodo etiquetado como N es un nodo que desea conocer su posición, y los nodos s , t y v son nodos empleados por N para retransmitir información entre él y las balizas. La Figura 2.15(a) especifica las distancias en saltos más cortas de s hacia B_1 , B_2 y B_3 como 2, 2 y 4. La Figura 2.15(b) indica las distancias en saltos más cortas de t hacia B_1 , B_2 y B_3 como 2,

1 y 3. La Figura 2.15(c) las distancias en saltos más cortas de t hacia B_1 , B_2 y B_3 como 2, 1 y 3, y finalmente, la Figura 2.15(d) las distancias en saltos más cortas entre N hacia B_1 , B_2 y B_3 como 3, 2 y 3. La Tabla 2.2 resume esta información. Conforme van determinando sus distancias hacia las balizas, los nodos proceden a intercambiar tal información entre su uno-vecindario. La Figura 2.16 ejemplifica el intercambio de distancias que realiza el nodo N con su uno-vecindario comprendido por nodos s , t y v . Una vez que se actualiza la información con el uno-vecindario, el nodo N estima las distancias promedio que hay entre él y las tres balizas. Las resoluciones matemáticas 2.4 corresponden a las distancias promedio estimadas de N hacia cada baliza.

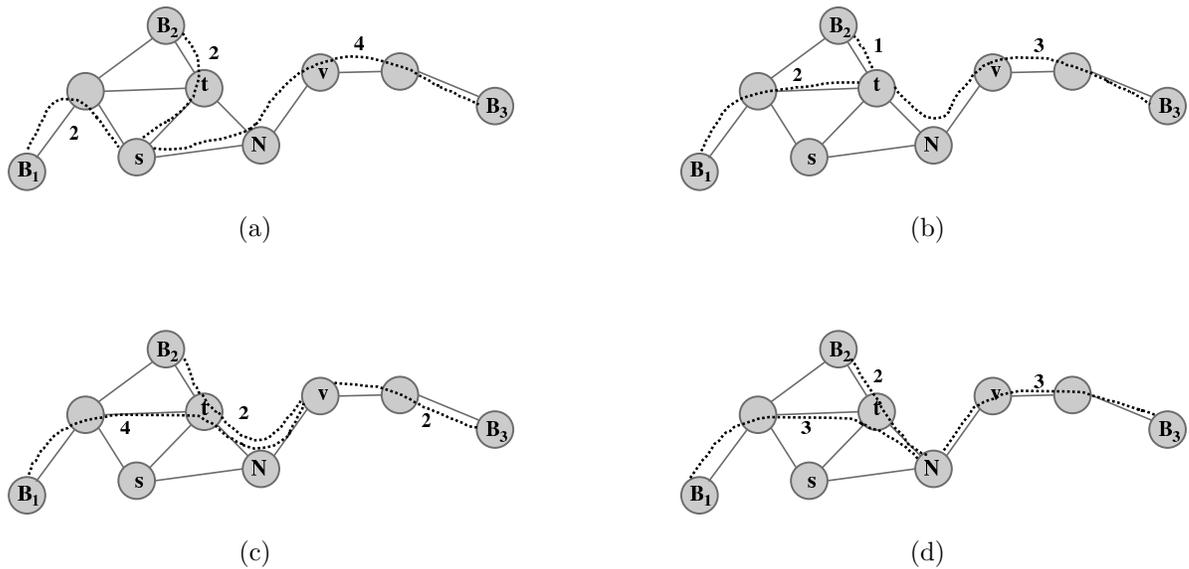
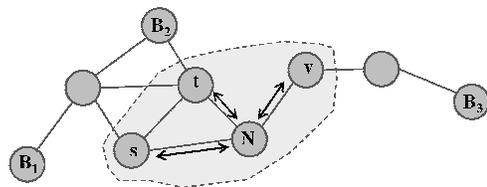


Figura 2.15: Ejemplo de estimación de distancias en Amorphous.



	Baliza B_1	Baliza B_2	Baliza B_3
Nodo s	2	2	4
Nodo t	2	1	3
Nodo v	4	2	2
Nodo N	3	2	3

Figura 2.16: Ejemplo de intercambio de distancias entre nodos vecinos en Amorphous.

Tabla 2.2: Resumen de distancias entre nodos y balizas en Amorphous.

$$\begin{aligned}
 d_{B_1} &= ((2 + 2 + 4 + 3)/4) - 0.5 = 2.25 \\
 d_{B_2} &= ((2 + 1 + 2 + 3)/4) - 0.5 = 1.50 \\
 d_{B_3} &= ((4 + 3 + 2 + 3)/4) - 0.5 = 2.50
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

2.3.2.3. Centroid

Centroid [10] es un algoritmo de posicionamiento libre de distancias basado en proximidad. Por lo tanto, para estimar su posición, un nodo arbitrario emplea únicamente aquellas balizas que se encuentran en su uno-vecindario, las cuales superponen sus regiones de cobertura. Este algoritmo estima posición en dos etapas: En la primer etapa las balizas situadas en posiciones conocidas $\{X_1, Y_1\}$ a $\{X_n, Y_n\}$ transmiten periódicamente mensajes conteniendo sus respectivas posiciones. En la segunda y última etapa, los nodos contabilizan los mensajes recibidos cada período de tiempo predeterminado. Los autores definen esta recolección de información como *Métrica de Conectividad* (MC). La MC es empleada para caracterizar información de cada baliza y se calcula empleando la Ecuación 2.5. La MC se define como la relación entre el número de mensajes recibidos ($Mrcv(i, t)$) de la baliza i en un período t y el número de mensajes enviados ($Menv(i, t)$) por la baliza i en el mismo período. Después de determinar la MC para cada baliza, los nodos infieren proximidad a una colección de balizas para las cuales sus respectivas métricas de conectividad exceden un umbral del 90%. Finalmente, los nodos estiman su posición como centroide del subconjunto de balizas seleccionadas usando la Ecuación 3.10.

$$MC_i = \frac{Mrcv(i, t)}{Menv(i, t)} \times 100 \quad (2.5)$$

$$(X_{est}, Y_{est}) = \left(\frac{X_{i_1} + \dots + X_{i_k}}{K}, \frac{Y_{i_1} + \dots + Y_{i_k}}{K} \right) \quad (2.6)$$

Ejemplo

En el ejemplo de la Figura 2.17, los nodos B_1, B_2, B_3 y B_4 representan balizas, y N es un nodo que desea conocer su posición. En este ejemplo las balizas B_1, B_2, B_3 y B_4 transmiten mensajes cada 3 segundos y el nodo N calcula la MC correspondiente por cada baliza cada 30 seg. En un caso perfecto, según los valores antes especificados, las balizas envían 10 mensajes en 30 seg y el nodo N recibe 10 mensajes en el mismo período. Sin embargo, en este ejemplo se pretende ilustrar el cálculo de la posición de un nodo cuando hay pérdida de mensajes. Entonces, se parte del supuesto que el nodo N recibió 10, 8, 10 y 10 mensajes de las balizas B_1, B_2, B_3 y B_4 respectivamente, después de la primera recolección de información. Con estos valores el nodo N calcula la MC para cada baliza, y los valores resultantes se presentan en la Tabla 2.3. Por último, el nodo N estima su posición como centroide del triángulo (ver Figura 2.17) cuyos vértices son representados por las coordenadas de las balizas B_1, B_3 y B_4 , las cuales mantienen una MC por encima del 90%. Las principales características que distinguen a Centroid son su simplicidad y fácil implementación.

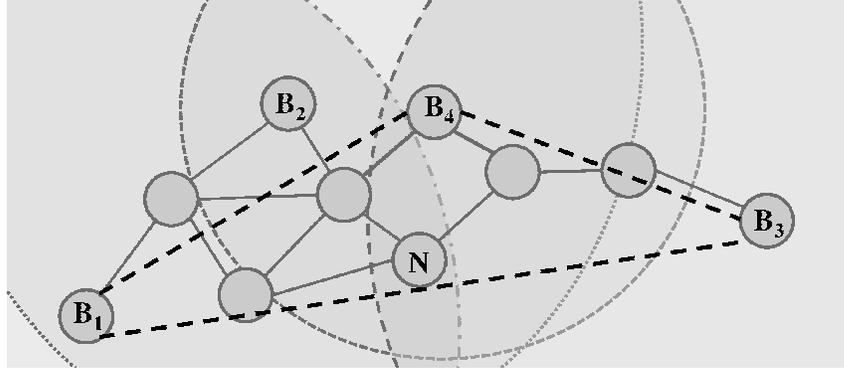


Figura 2.17: Ejemplo de estimación de MC en Centroid.

Balizas	MC (%)
B_1	100
B_2	80
B_3	100
B_4	100

Tabla 2.3: Resumen de MC del nodo N con respecto a las balizas B_1 , B_2 , B_3 y B_4 .

2.3.2.4. APIT

Otro algoritmo en la categoría de algoritmos de posicionamiento libres de distancia es APIT [21]. Este algoritmo emplea un enfoque novedoso basado en área para estimar posición. El algoritmo genera regiones triangulares de todas las balizas disponibles (ver Figura 2.18). La presencia de un nodo fuera o dentro de estas regiones triangulares permite a un nodo reducir el área en el cual potencialmente reside. Para reducir el diámetro de dicha área y brindar una buena estimación de posición, APIT utiliza todas las posibles combinaciones de las balizas de las cuales recibe información de localización. El algoritmo básicamente opera en cuatro etapas: La primera etapa, las balizas transmiten información de localización periódicamente. Un nodo arbitrario, una vez que recibe información de localización de las balizas ubicadas en su uno-vecindario, mantiene una tabla que contiene el identificador de la baliza, sus coordenadas x y y , así como el identificador de la intensidad de la señal recibida. Posteriormente, intercambian esta información con sus uno-vecinos. En la segunda etapa, un nodo que desea estimar su posición utiliza esta información para ejecutar la prueba APIT con el objetivo de determinar si está dentro o fuera de una región triangular. El nodo ejecuta la prueba APIT por cada combinación de balizas existente. En la etapa tres, una vez que las pruebas individuales APIT terminan, APIT emplea un algoritmo de escaneo de malla (grid scan) para agregar los resultados en un arreglo de malla. Este arreglo de malla (ver Figura 2.19) se utiliza para representar y calcular el área máxima en el cual un nodo posiblemente puede residir. Una vez que todas las regiones triangulares son calculadas, el nodo emplea la información resultante para encontrar el área máxima de superposición. Finalmente, en la cuarta eta-

pa, el nodo estima su posición como centro de gravedad del área máxima de superposición.

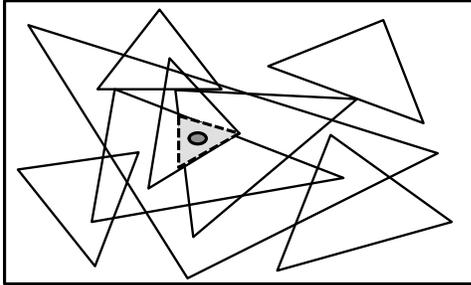


Figura 2.18: Algoritmo APIT basado en área.

0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
0	1	2	2	1	1	0	-1	0	0
1	1	2	2	1	1	0	-1	-1	0
0	0	2	2	2	1	0	-1	-1	-1
0	0	1	1	1	0	0	-1	-1	-1

Figura 2.19: Enfoque escaneo de malla.

Ejemplo

Se supone la existencia de tres balizas B_1 , B_2 y B_3 ubicadas en las posiciones x y y (20,20), (45,31) y (23,56). Asimismo un conjunto de nodos N_1 a N_n con interés de saber su posición. Después de recibir la información de localización proveniente de las balizas B_1 , B_2 y B_3 , cada nodo N mantiene una tabla con el identificador de cada baliza B_i , sus posiciones X_i y Y_i , y el nivel de potencia de la señal recibida IS_i . Para fines ilustrativos las Tablas 2.4 y 2.5 únicamente se concretan en presentar información correspondiente a un par de nodos.

Baliza	X	Y	IS
B_1	20	20	1mv
B_2	45	31	2mv
B_3	23	56	3mv

Tabla 2.4: Información de balizas del Nodo N_1 .

Baliza	X	Y	IS
B_1	20	20	2mv
B_2	45	31	3mv
B_3	23	56	3mv

Tabla 2.5: Información de balizas del Nodo N_2 .

Posteriormente, cada nodo intercambia esta información con sus uno-vecinos. Las Tablas 2.6 y 2.7 reflejan información intercambiada y combinada también de un par de nodos.

Baliza	X	Y	Mi (IS)	IS_2	...	IS_n
B_1	20	20	1mv	2mv	...	6mv
B_2	45	31	2mv	3mv	...	7mv
B_3	23	56	3mv	1mv	...	7mv

Tabla 2.6: Información combinada del nodo N_1

Baliza	X	Y	Mi (IS)	IS_1	...	IS_n
B_1	20	20	2mv	1mv	...	6mv
B_2	45	31	3mv	2mv	...	7mv
B_3	23	56	1mv	3mv	...	7mv

Tabla 2.7: Información combinada del nodo N_2 .

Enseguida, el algoritmo realiza las pruebas individuales APIT. Para ello, emplea de entrada la información las Tablas 2.6 y 2.7. APIT ejecuta cada columna IS_i de la tabla para determinar si existe un nodo vecino que esté más cercano (con mayor valor de IS) o más

lejano (con menor valor de IS), simultáneamente, a las balizas B_1 , B_2 y B_3 . Si no existe tal vecino, entonces el nodo se considera dentro del triángulo definido por este conjunto de balizas. De otra manera se considera fuera del triángulo. Entonces, de acuerdo a la información mantenida por los nodos N_1 y N_2 de acuerdo a las Tablas 2.6 y 2.7, para este ejemplo, la prueba APIT reporta ambos nodos fuera del triángulo.

2.4. Resumen general

En este capítulo se presentó el concepto, características y aplicaciones de MANETs a manera de introducción a los temas de enrutamiento y posicionamiento en el mismo ámbito. De enrutamiento se presentó la definición y una de las clasificaciones de los protocolos, la clasificación de acuerdo a la manera que éstos diseminan la información. Con respecto a posicionamiento, su definición, las técnicas empleadas para llevar a cabo la estimación de posición y los principales tipos de aplicaciones donde se puede apreciar de manera clara la importancia del posicionamiento. Finalmente, la descripción detallada del modo de operar de los principales protocolos de enrutamiento y posicionamiento permitió identificar dos mecanismos básicos en común: el mecanismo para determinar las distancias (en saltos) entre par de nodos y el mecanismo para determinar el uno-vecindario de cada nodo.

Capítulo 3

Análisis comparativo de algoritmos de posicionamiento libres de distancia para MANETs usando modelos de propagación de radio señal en 2D y 3D

3.1. Introducción

En la literatura existe una variedad de propuestas de solución al problema de localización de un nodo de una MANET. En general, las diferentes propuestas pueden clasificarse en dos categorías: algoritmos *basados en distancias* y algoritmos *libres de distancias*. Los algoritmos basados en distancias dependen, entre otros aspectos, de la medición de los atributos físicos de las señales inalámbricas transmitidas entre los nodos que componen la red. Los más comunes son la intensidad de la señal recibida (RSSI) [56], ángulo de llegada (AoA) [36][47], tiempo de llegada de la señal (ToA) [36][47] y diferencia de tiempos de llegada entre ondas de radio y ondas de ultrasonido (TDoA) [36][47]. La principal desventaja de esquemas basados en distancias es que usualmente cada nodo requiere estar equipado con hardware adicional especializado, lo cual incrementa el costo de implementación y la energía consumida por los nodos móviles. Por otra parte, los algoritmos de posicionamiento libres de distancias generalmente emplean la distancia en saltos a una referencia (o baliza) como su principal métrica de distancia. Los algoritmos más representativos de esta categoría son DV-Hop [38], Amorphous [37], Centroid [10] y APIT [21]. Las principales fortalezas de los algoritmos libres de distancias son su simplicidad y bajo costo de implementación. Las principales limitantes son que estos esquemas usualmente sufren de errores de localización más altos que sus homólogos basados en distancias y que generalmente asumen distribuciones más densas e isotrópicas de los nodos.

A pesar de una gran cantidad de trabajo sobre el diseño de algoritmos de posicionamiento distribuidos para MANETs, la mayor parte de los resultados experimentales reportados en la literatura están basados en implementaciones centralizadas que no consideran los efectos de la capa física ni la manera en que las pilas de protocolos de los nodos interactúan una con otra. No obstante, en escenarios realistas los paquetes de datos se pierden debido a los efectos de propagación de la señal de radio, a las colisiones y a la contención. Esta última afecta la calidad de la información topológica disponible para los nodos, y por ende a la precisión alcanzada por los algoritmos de posicionamiento. Por lo tanto, con el fin de evaluar efectivamente el rendimiento de estos algoritmos, este capítulo presenta los resultados de experimentos más detallados que miden los efectos de la capa física y la movilidad.

3.2. Algoritmos de posicionamiento libres de distancias

En esta sección se presenta la descripción de cuatro de los más representativos algoritmos de posicionamiento para MANETs. Todos estos algoritmos asumen que sólo una fracción de nodos, conocidos como *balizas* o *anclas*, conocen su posición. Las posiciones de estos nodos son usados como referencia para estimar la posición de los nodos restantes.

El algoritmo DV-Hop [38] y sus variantes (Por ejemplo, [27][62]) trabajan similar a los protocolos de enrutamiento basados en vector de distancias [8] como DSDV [40] en el sentido de que algunos nodos (balizas en el caso de DV-Hop) inundan periódicamente la red con paquetes de control para establecer un ordenamiento de los nodos hacia las balizas. Este proceso se basa en las distancias en saltos y además, permite informar a todos los nodos del componente conexo sobre la posición actual de cada baliza. De esta manera, cada nodo tiene conocimiento de la ubicación de las balizas y de su distancia en saltos hacia ellas. Entonces, cada baliza utiliza la información recibida de otras balizas para calcular su *promedio de longitud de un salto* (*promedio de tamaño de un salto* en la terminología DV-Hop). En una segunda fase, las balizas diseminan sus estimaciones de promedio de longitud de un salto y los nodos utilizan esta información para calcular las estimaciones de sus distancias Euclidianas hacia las balizas. Con la posición de al menos tres balizas y las distancias Euclidianas estimadas hacia ellas, los nodos usan trilateración para estimar sus posiciones.

En Amorphous [37] el *promedio de longitud de un salto* es calculado fuera de línea y se basa en el supuesto de que la densidad de nodos es homogénea y constante a través del tiempo, por ende, calculado *a priori*. Al igual que en DV-Hop, las balizas inundan la red con el fin de publicar sus posiciones y establecer un orden de los nodos. Entonces, los nodos utilizan trilateración para estimar sus propias posiciones.

En Centroid [10], las balizas emiten mensajes de localización a sus uno-vecinos y los nodos simplemente estiman su posición como el centroide del polígono, donde sus vértices son las balizas. En APIT (*Approximate Point-In Triangulation*) las balizas también transmiten mensajes de localización a sus uno-vecinos. Entonces, los nodos generan todas las combinaciones, de tres, de las balizas conocidas y aplican una prueba PIT (*Point-In Triangulation*)[21] para determinar si ellos están localizados dentro de cada triángulo. Por último, los nodos emplean un algoritmo de escaneo de malla (*grid-scan algorithm*)[22] para determinar el área de intersección del número máximo de triángulos. Entonces, los nodos estiman su posición como el centroide de esta área.

3.3. Algoritmos de posicionamiento libres de distancias: Extensiones 3D

Las versiones originales de DV-Hop, Amorphous, Centroid y APIT fueron diseñadas para estimar la posición de nodos en dos dimensiones (2D). Ahora bien, puesto que los nodos

en MANETs generalmente están situados en un espacio tridimensional (Por ejemplo, en un edificio, bajo el agua, en terrenos montañosos, etc.), en esta sección se presenta las extensiones de los algoritmos antes mencionados para que estimen la posición de nodos en tres dimensiones.

3.3.1. DV-Hop 3D

El algoritmo DV-Hop 3D opera en dos fases. En la primera fase, las balizas diseminan cada $DisPeriod$ segundos mensajes de localización a través de la red (Algoritmo 1). Un mensaje de localización ($LocMsg$) es una tupla que tiene seis componentes de la forma $(id_{beacon}, seq, hopcount, x, y, z)$ donde id_{beacon} es el identificador de la baliza en la red, seq es un número de secuencia que se utiliza para descartar información obsoleta, $hopcount$ contiene el número de saltos que ha atravesado hasta ahora el mensaje, y x, y y z almacenan la posición de la baliza. Como la posición de las balizas es propagada a través del componente conexo, los nodos y balizas almacenan en la estructura de datos LOC el mejor mensaje de localización recibido hasta ahora (Algoritmo 2). Un mensaje de localización m_1 es considerado mejor que un mensaje de localización m_2 , denotado por $m_1 > m_2$, si m_1 reporta un número de secuencia más grande, o si los dos números de secuencia son iguales pero el número de saltos reportado por m_1 es menor. Cuando un nodo o baliza recibe un mensaje de localización m que es mejor que el actual, se transmite un nuevo mensaje m_{new} , con $m_{new} = (m.id_{beacon}, m.seq, m.hopcount + 1, m.x, m.y, m.z)$. Los nodos y balizas registran, en la variable llamada $d.hop_j$, la distancia más corta conocida hacia cada baliza j localizada en el mismo componente conexo. Los mensajes son eliminados de LOC después de tres $DisPeriod$ segundos.

Input: β : beacon identifier, seq : local sequence number

```

1  $seq \leftarrow seq + 1$ ;
2  $getCurrent(x, y, z)$ ;
3 Transmit  $LocMsg(\beta, seq, 1, x, y, z)$ ;

```

Algoritmo 1: DV-Hop 3D: Las balizas inician la diseminación de mensajes de localización.

En la segunda fase, cada baliza β emplea la información de localización recolectada de las otras balizas y la Ecuación 3.1 para estimar su *promedio de longitud de un salto* ($hopLength_\beta$). Entonces, cada baliza inunda la red con mensajes $HopLengthMsg = (id_{beacon}, seq, hopLength)$ donde id_{beacon} denota el identificador de la baliza, seq el número de secuencia y $hopLength$ el promedio de longitud de un salto, calculado por la baliza con identificador id_{beacon} . Cuando el mensaje $HopLengthMsg$ es propagado a través de la red, los nodos almacenan el mejor mensaje recibido hasta ahora en su estructura de datos AHL (Algoritmo 3). Una vez más, un mensaje con un número de secuencia más grande se considera mejor que otro. Cuando se recibe un mensaje mejor, éste se retransmite, de lo contrario simplemente se descarta. Los mensajes $HopLengthMsg$ obsoletos son eliminados cada tres $DisPeriod$ segundos de AHL .

$$hopLength_\beta = \frac{\sum_{\forall m \in LOC} \sqrt{(x_\beta - m.x)^2 + (y_\beta - m.y)^2 + (z_\beta - m.z)^2}}{\sum_{\forall m \in LOC} m.hopcount} \quad (3.1)$$

Input: m : incoming *LocMsg*, id : local identifier, seq : local sequence number, LOC : local location message set;

```

1 if ( $m.id_{beacon} == id$ ) then
2   | return;
3 if  $\nexists n \in LOC \mid n.id_{beacon} == m.id_{beacon}$  then
4   |  $LOC \leftarrow LOC \cup \{m\}$ ;
5   | Transmit LocMessage( $m.id_{beacon}$ ,  $m.seq$ ,  $m.hopcount + 1$ ,  $x.y$ ,  $m.y$ ,  $m.z$ );
6 else if  $m > n$  then
7   |  $LOC \leftarrow LOC \cup \{m\} \setminus \{n\}$ ;
8   | Transmit LocMsg( $m.id_{beacon}$ ,  $m.seq$ ,  $m.hopcount + 1$ ,  $x.y$ ,  $m.y$ ,  $m.z$ );
9 if local node is a beacon AND  $|LOC| > 3$  then
10  |  $seq \leftarrow seq + 1$ ;
11  | Compute hopLength; // According to Eq. 3.1
12  | Transmit HopLengthMsg( $id_{beacon}$ ,  $seq$ , hopLength);

```

Algoritmo 2: DV-Hop 3D: Administrador de mensajes *LocMsg*.

Input: m : incoming *HopLengthMsg* message, id : local identifier, AHL : local average hop length message set;

```

1 if ( $m.id_{beacon} == id$ ) then
2   | return;
3 if  $\nexists n \in AHL \mid n.id_{beacon} == m.id_{beacon}$  then
4   |  $AHL \leftarrow AHL \cup \{m\}$ ;
5   | Transmit HopLengthMsg( $m.id_{beacon}$ ,  $m.seq$ ,  $m.hopLength$ );
6 else if  $m.seq > n.seq$  then
7   |  $AHL \leftarrow PLS \cup \{m\} \setminus \{n\}$ ;
8   | Transmit HopLengthMsg( $m.id_{beacon}$ ,  $m.seq$ ,  $m.hopLength$ );

```

Algoritmo 3: Administrador de mensajes *HopLengthMsg*.

Cada vez que un nodo recibe un mensaje *hopLength* con un número de secuencia más grande, extrae de *AHL* la información actual sobre la baliza más cercana en saltos (denotada como $m_{nearest}$) y emplea la Ecuación 3.2 para actualizar sus estimaciones de distancias hacia las balizas conocidas b_i .

$$d_{b_i} = d_{hop_{b_i}} \times m_{nearest} \cdot hopLength \quad (3.2)$$

Con la información acerca de la posición de cuatro balizas no coplanares y estimaciones de distancias a cada una de esas balizas, los nodos calculan su posición por medio del método de trilateración. Si se conocen más de cuatro balizas, los nodos sólo tienen que seleccionar las balizas más cercanas (en número de saltos). El método de Trilateración consiste en resolver el Sistema de ecuaciones 3.3, donde x_{β_i} con $i \in \{1, 2, 3\}$ denota la coordenada x de la baliza i , y_{β_i} con $i \in \{1, 2, 3\}$ denota la coordenada y de la baliza i , z_{β_i} con $i \in \{1, 2, 3\}$ denota la coordenada z de la baliza i y d_{β_i} denota la distancia a la baliza i . Desafortunadamente, en situaciones donde las estimaciones de distancias no son fiables, trilateración sufre de *incertidumbre* Figura 3.1(a) cuando cuatro esferas no se cruzan en un único punto, *inconsistencia* Figura 3.1(b) en el que los diferentes grupos de cuatro balizas producen resultados distintos y ambigüedad Figura 3.1(c) donde el sistema de ecuaciones tiene dos soluciones espejo [60]. Por otra parte, incluso con estimaciones perfectas de distancias, trilateración también puede fallar si el nodo es coplanar con cualquier grupo de tres balizas de las cuatro utilizadas como referencias.

$$\begin{aligned} (x - x_{\beta_1})^2 + (y - y_{\beta_1})^2 + (z - z_{\beta_1})^2 &= d_{\beta_1}^2 \\ (x - x_{\beta_2})^2 + (y - y_{\beta_2})^2 + (z - z_{\beta_2})^2 &= d_{\beta_2}^2 \\ (x - x_{\beta_3})^2 + (y - y_{\beta_3})^2 + (z - z_{\beta_3})^2 &= d_{\beta_3}^2 \end{aligned} \quad (3.3)$$

El principal inconveniente de DV-Hop es que asume que la red es isotrópica y por lo tanto que la longitud de un salto permanece constante a lo largo de los caminos que conectan los nodos con sus balizas más cercanas. Debido a que esto no es necesariamente cierto, los errores en las distancias estimadas hacia las balizas podrían ser grandes (see Fig.3.1(d)). Por otra parte, ya que no hay coordinación entre los nodos y balizas, es posible que el promedio de longitud de un salto, reportado por una baliza y usado por un nodo, haya sido calculado con información de una región de la red que no contiene al nodo. Por otro lado, DV-Hop inunda la red $\Theta(B)$ veces cada periodo de difusión, donde B es el número de balizas activas en la red. Ésto último puede limitar la escalabilidad de la red, ya que las operaciones de inundación son muy costosas en términos de ancho de banda [53] y energía. Por último, la longitud de las estructuras de datos mantenida por los nodos es $\Theta(B)$ que es bastante pequeña.

3.3.2. Amorphous 3D

En Amorphous 3D, las balizas inundan la red (Algoritmo 4) cada *DisPeriod* segundos con mensajes de localización (*LocMsg*) que informan a los nodos del componente conexo acerca

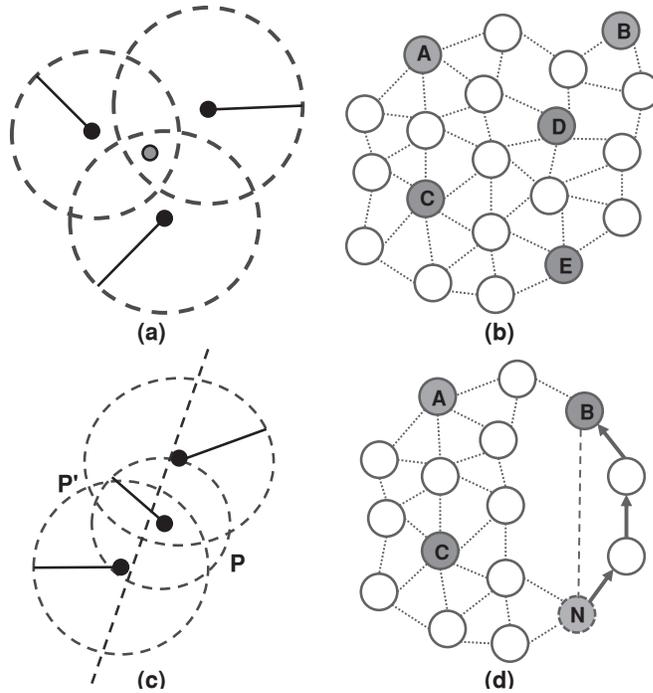


Figura 3.1: Deficiencias de trilateración. (a) Incertidumbre. (b) Ambigüedad. (c) Inconsistencia. (d) Ejemplo de una red no isotrópica.

de la posición actual de las balizas, la distancia en saltos hacia ellas y la circunscripción de su uno-vecindario. Un mensaje de localización *LocMsg* es una tupla de siete elementos de la forma $(id_{beacon}, id_{node}, seq, hopcount, x, y, z)$ donde id_{beacon} denota el identificador de la baliza en la red, id_{node} el identificador del nodo que está transmitiendo el mensaje, seq el número de secuencia el mensaje que es usado para descartar información obsoleta, $hopcount$ la distancia más corta hacia la baliza con identificador id_{beacon} conocida por el nodo con identificador id_{node} y x, y, z contiene la posición de la baliza.

Input: β :beacon identifier, seq : local sequence number

- 1 $seq \leftarrow seq + 1$;
- 2 $getCurrent(x, y, z)$;
- 3 Transmit $LocMsg(\beta, \beta, seq, 1, x, y, z)$;

Algoritmo 4: Amorphous 3D: Las balizas inician la disseminación de mensajes de localización.

Los nodos mantienen una estructura de datos $Neighborhood_{\beta}$ por cada baliza conocida β (Algoritmo 5). $Neighborhood_{\beta}$ almacena el mejor mensaje de localización recibido de cada vecino con respecto a cada baliza β . De manera similar a DV-Hop, un mensaje m_1 es considerado mejor que un mensaje m_2 , denotado por $m_1 > m_2$, si m_1 reporta un número de secuencia más grande, o si los dos números de secuencia son iguales pero el número de saltos reportado por m_1 es menor. De esta manera, los nodos conocen sus distancias hacia las balizas conocidas reportadas por sus uno-vecinos. Además, por cada baliza β , los nodos registran los mejores mensajes recibidos hasta ahora (m_{best}^{β}). Cada vez que un nodo i recibe un mejor mensaje de localización de una determinada baliza, se actualiza el valor

de m_{best}^β y se transmite un nuevo mensaje $m = (\beta, i, m_{best}^\beta.seq, m_{best}^\beta.hopcount + 1, m_{best}^\beta.x, m_{best}^\beta.y, m_{best}^\beta.z)$ como se muestra en Algoritmo 5. De esta manera, los nuevos mensajes de localización con números de secuencia más grandes, son diseminados a través de toda la red.

Input: m : incoming *LocMsg* message, id : local identifier;

```

1 if ( $m.id_{node} == id$ ) then
2   | return;
3  $\beta \leftarrow m.id_{beacon}$ ;
4 if  $\nexists Neighborhood_\beta$  then
5   |  $Neighborhood_\beta \leftarrow \emptyset$ ;
6 if  $\nexists n \in Neighborhood_\beta \mid n.id_{node} == m.id_{node}$  then
7   |  $Neighborhood_\beta \leftarrow Neighborhood_\beta \cup \{m\}$ ;
8 else if  $m > n$  then
9   |  $Neighborhood_\beta \leftarrow Neighborhood_\beta \cup \{m\} \setminus \{n\}$ ;
10 if  $\forall l \in Neighborhood_\beta \mid l.id_{node} \neq m.id_{node} : m > l$  then
11   |  $m_{best}^\beta \leftarrow m$ ;
12   | Transmit LocMsg( $\beta, i, m_{best}^\beta.seq, m_{best}^\beta.hopcount + 1, m_{best}^\beta.x, m_{best}^\beta.y, m_{best}^\beta.z$ );

```

Algoritmo 5: Amorphous 3D: Administrador de mensajes *LocMsg*.

Con el objetivo de conseguir una mejor resolución, los nodos utilizan un proceso de suavizado para calcular las distancias en saltos hacia las balizas. En lugar de utilizar directamente las distancias en saltos (h_i^b) hacia las balizas b , que en general produce una sobreestimación, el nodo i estima el valor de $h_i^b - 1 + x_i^b$ usando la Ecuación 3.4. En la Ecuación 3.4, x_i^b es una variable aleatoria con $0 \leq x < 1$ que determina si la distancia real del nodo i hacia la baliza b es más corta hacia h_i^b o hacia $h_i^b - 1$. La estimación de $h_i^b - 1 + x_i^b$, calculada usando la Ecuación 3.4, se deriva de una red unidimensional y supone que la densidad λ de los nodos es homogénea y constante a través del tiempo.

$$h_i^b + x_i^b = \frac{(\sum_{\forall m \in Neighborhood_b} m.hopcount) + m_{best}.hopcount + 1}{|Neighborhood_b| + 1} - 0.5 \quad (3.4)$$

La Ecuación 3.4 calcula el promedio de la distancia del propio nodo i y las distancias reportadas por los vecinos del nodo i , y después le resta $1/2$. Para una dimensión, como es ilustrado en la Figura 3.2, el promedio se puede calcular mediante la Ecuación 3.5 donde cada uno de los términos en el numerador corresponde a la contribución de los nodos con distancias hacia la baliza igual a $h_i^b - 1$, h_i^b y $h_i^b + 1$, respectivamente. Entonces, por simple álgebra, la Ecuación 3.5 queda reducida a la Ecuación 3.6 que es precisamente el valor que se desea calcular.

$$\frac{r\lambda(1 - x_i^b)(h_i^b - 1) + r\lambda(h_i^b) + r\lambda(x_i^b)(h_i^b + 1)}{2r\lambda} - 0.5 \quad (3.5)$$

$$h_i^b - 1 + x_i^b \quad (3.6)$$

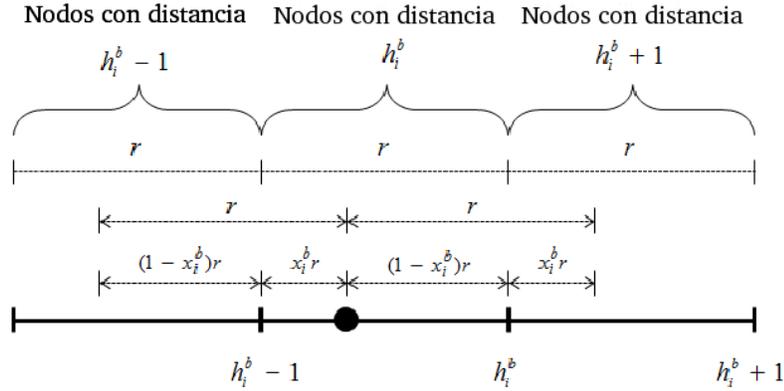


Figura 3.2: Derivación de la Ecuación 3.4

Entonces, el nodo i usa la Ecuación 3.7 para calcular su distancia estimada (d_i^b) hacia la baliza b . En la Ecuación 3.7, $avgHopLength$ denota el promedio de longitud de salto, el cual en el caso de Amorphous es calculado fuera de línea por medio de la Ecuación 3.8. La Ecuación 3.8 es la extensión 3D de la ecuación original presentada en [30] y su derivación es mostrada en el Apéndice A. Las derivaciones de las dos ecuaciones asumen que la densidad λ de los nodos es constante y uniforme. Por lo tanto, λ puede ser expresada en términos del rango de transmisión r y el tamaño esperado del uno-vecindario n_{local} , o en otras palabras, el número esperado de nodos situados dentro del radio de una esfera. Por último, con la posición conocida de por lo menos cuatro balizas y las estimaciones de distancias a ellas, los nodos utilizan trilateración para calcular su posición.

$$d_i^b = (h_i^b + x_i^b) \times avgHopLength \quad (3.7)$$

$$avgHopLength = R(1 + e^{-n_{local}} - \int_{-1}^1 e^{\frac{-n_{local}}{4}(2-3t+t^3)} dt) \quad (3.8)$$

La principal limitación de Amorphous es su fuerte suposición acerca de que la densidad de los nodos es homogénea y constante a través de toda la red. Ésto último, en general, no es necesariamente cierto, aún cuando se haga referencia a redes estáticas tales como redes de sensores donde todos los nodos son ubicados manualmente. Amorphous también hereda las limitaciones de trilateración descritas en la Sección 1.3.1. Por otra parte, al igual que DV-Hop, Amorphous inunda la red $\Theta(B)$ veces cada periodo de disseminación. Sin embargo, la constante de Amorphous, oculta por la notación asintótica, es la mitad en relación a DV-Hop. Esto hace que Amorphous sea más escalable que DV-Hop. Finalmente, la cantidad de memoria usada por cada nodo es $\Theta(B \times n_{local})$, que se considera todavía pequeña.

3.3.3. Centrod 3D

Centroid 3D es un algoritmo simple que opera en dos fases. En la primera fase, las balizas transmiten mensajes de localización a sus uno-vecinos cada periodo de diseminación de τ segundos (Algoritmo 6). Los mensajes de localización (*LocMsg*) son una tupla compuesta por cuatro elementos de la forma (id_{beacon}, x, y, z) donde id_{beacon} es el identificador de la baliza y x, y y z contienen la posición de la baliza. Los nodos mantienen un contador de mensajes M_β por cada baliza con la que tienen transmisión directa. Cada vez que un nodo recibe mensaje de una baliza β , almacena la posición de la baliza e incrementa el valor de M_β en una unidad (Algoritmo 7). Los contadores M_β son puestos en cero cada T segundos con $T > \tau$. A partir de un número de mensajes recibidos dentro de un periodo T, los nodos calculan una *métrica de conectividad* CM_β por cada baliza que ellos conocen. Como se muestra en la Ecuación 3.9, CM_β simplemente se calcula como la relación entre el número de mensajes recibidos (MR_β) de la baliza β en un periodo T y el número de mensajes enviados por la baliza β en el mismo periodo.

Input: β :beacon identifier;
1 get`Current`(x, y, z);
2 Transmit *LocMsg*(β, x, y, z);

Algoritmo 6: Balizas envían mensajes *LocMsg* a sus uno-vecinos.

Input: m : incoming *LocMsg* message, *LOC* set of received messages
1 **if** $\nexists n \in LOC \mid n.id_{beacon} == m.id_{beacon}$ **then**
2 $LOC \leftarrow LOC \cup \{m\}$;
3 $M_{m.id_{beacon}} \leftarrow 1$;
4 **else**
5 $LOC \leftarrow LOC \cup \{m\} \setminus \{n\}$;
6 $M_{m.id_{beacon}} \leftarrow M_{m.id_{beacon}} + 1$;

Algoritmo 7: Centroid 3D: Administrador de mensajes *LocMsg*.

$$CM_\beta = \frac{MR_\beta}{\lceil T/\tau \rceil} \quad (3.9)$$

De entre sus balizas conocidas, cada nodo elige un subconjunto (denotadas por B) cuya métrica de conectividad está por encima de un umbral predefinido de conectividad. Entonces, los nodos usan la Ecuación 3.10 para estimar su posición como la media aritmética de cada componente de las posiciones reportadas por las balizas B .

$$(x, y, z) = \left(\frac{x_1 + \dots + x_{|B|}}{|B|}, \frac{y_1 + \dots + y_{|B|}}{|B|}, \frac{z_1 + \dots + z_{|B|}}{|B|} \right) \quad (3.10)$$

Las principales ventajas de Centroid son su baja complejidad y el hecho de que es relativamente fácil de implementar. Por otro lado, sin embargo, Centroid puede sufrir de errores de estimación grandes cuando hay un número bajo de balizas disponibles. Además es común encontrar situaciones en las que muchos nodos concluyen que se encuentran en la

misma posición. La cobertura de Centroid también es baja a menos de que se aumente la potencia de transmisión de las balizas. Esto, sin embargo, es perjudicial para la capacidad de la red, ya que limita la reutilización espacial del ancho de banda. Por último, dado que las balizas no inundan sus componentes conexos, la complejidad de la red es también baja.

3.3.4. APIT 3D

En APIT, las balizas inician el proceso de estimación transmitiendo periódicamente mensajes de localización $LocMsg = (\beta, x, y, z)$ a su uno-vecindario (Algoritmo 6). Cuando un nodo i recibe un mensaje de localización de la baliza β , calcula el identificador de intensidad de la señal recibida $RSSI_\beta$ del nivel de potencia de la señal de radio recibida y genera un mensaje $NeigMsg = (\beta, i, X, Y, Z, RSSI_\beta)$ que es almacenado en una estructura de datos local (NBR) y posteriormente transmitido a sus uno-vecinos (Algoritmo 8). En la estructura de datos NBR , los nodos mantienen sólo el mensaje más reciente recibido de cada vecino sobre una baliza dada.

Input: m : incoming $LocMsg$ message, LOC set of received messages, i : local identifier;

```

1  $rssi_b \leftarrow getRSSI(m)$ ;
2  $r \leftarrow NeigMsg(\beta, i, x, y, z, rssi_b)$ ;
3 if  $\nexists n \in LOC \mid n.neighbor == r.neighbor \text{ AND } n.beacon == r.beacon$  then
4   |  $LOC \leftarrow LOC \cup \{r\}$ ;
5 else
6   |  $LOC \leftarrow LOC \cup \{r\} \setminus \{n\}$ ;
7 Transmit  $r$ ;
```

Algoritmo 8: APIT 3D: Administrador de mensajes de entrada $LocMsg$.

En una segunda fase, los nodos emplean la información almacenada en NBR para llevar a cabo la prueba PIT (*Point-In-Tetrahedron*) [21] sobre las combinaciones de cuatro balizas del total de balizas conocidas. El objetivo de la prueba PIT es determinar si el nodo está situado en el interior de cada uno de los tetraedros formados por las diferentes combinaciones de balizas. De esta manera, los nodos pueden restringir su posible posición al volumen definido por el número máximo de intersección de tetraedros que contienen al nodo. Como se muestra en Algoritmo 9, el poliedro de número máximo de intersección de tetraedros es determinado a través de un algoritmo de escaneo de malla [?].

La prueba PIT propuesta en [21] fue diseñada específicamente para operar en el contexto de las redes inalámbricas y trabaja como sigue. Para una combinación de cuatro balizas, los nodos determinan si existe un nodo vecino que esté más cercano (con menor valor de $RSSI$) o más alejado (con mayor valor de $RSSI$), de manera simultánea, a cada una de las cuatro balizas. Si no existe tal vecino, entonces el nodo se considera ubicado dentro del tetraedro definido por este conjunto de balizas. De otra manera, se considera fuera del tetraedro.

Por último, los nodos calculan su estimación de posición como el centroide del polígono definido por el número máximo de intersección tetraédrica, es decir, el volumen compuesto

por los cubos cuyo contador correspondiente $cubelet_{x,y,z}$ es máximo.

```

Input: NBR: set of location messages received from one hop neighbors, GRID: a 3D grid
          composed of cubelets with side length equal to  $0.1R$ 
1 TETRA  $\leftarrow$  set of tetrahedral;
  // all combinations of four beacons
2 foreach  $cubelet_{x,y,z} \in GRID$  do
3    $\lfloor cube_{x,y,z} \leftarrow 0;$ 
4 foreach  $t \in TETRA$  do
5   foreach  $m \in NBR$  do
6     if  $m.beacon \in t$  then
7        $\lfloor M \leftarrow M \cup \{m\};$ 
8   if  $PIT\_test(t, M) == TRUE$  then
9      $\forall cubelet_{x,y,z} \in GRID | cubelet_{x,y,z} \in t : cubelet_{x,y,z} \leftarrow cubelet_{x,y,z} + 1;$ 
10  else
11     $\forall cubelet_{x,y,z} \in GRID | cubelet_{x,y,z} \in t : cubelet_{x,y,z} \leftarrow cubelet_{x,y,z} - 1;$ 
12   $M \leftarrow \emptyset;$ 
13 return GRID;

```

Algoritmo 9: Cálculo del volumen que contiene a un nodo

La complejidad de APIT es baja debido a que no se inunda toda la red. Sin embargo, la cobertura también es baja debido a que los nodos necesitan escuchar transmisiones de al menos cuatro balizas para estimar su posición. Además, si sólo son escuchadas cuatro balizas, la precisión de APIT también es baja. De hecho, con sólo cuatro balizas APIT se comporta igual que Centroid. La complejidad espacial de la versión tridimensional de APIT es $\Theta(G^3)$, donde G^3 es el número de cubos que componen la malla tridimensional *GRID*. La complejidad del algoritmo es $O(G^3 \times B^4)$ donde B es el número máximo de balizas localizadas dentro del uno-vecindario de cualquier nodo. Esto se debe a que hay $\Theta(B^4)$ grupos diferentes de cuatro balizas de un total de B balizas.

3.4. Resultados Experimentales

3.4.1. Validación de los algoritmos

En esta sección se presentan los resultados obtenidos después de realizar un conjunto de pruebas experimentales de validación sobre las implementaciones de los algoritmos DV-Hop [38], Amorphous [37], Centroid [10] y APIT [21]. La validación consistió en replicar en la medida de lo posible las condiciones en las cuales cada uno de estos algoritmos fue evaluado originalmente, y con las cuales lograron obtener su mejor desempeño. Para cada escenario se realizaron 10 ejecuciones independientes, y se utilizó al *error de localización* como métrica para evaluar la correcta implementación de los algoritmos. Para el escenario de DV-Hop, se satisfacen las precondiciones de distribución uniforme de nodos y la no colinealidad entre balizas. Para el escenario de Amorphous, además de cumplir las precondiciones de distribución uniforme y no colinealidad entre balizas, se cumplió la precondición

Atributos	DV-Hop	Amorphous	Centroid	APIT
Número de nodos	25	81	25	25
Número de balizas	3	3	4	3
Rango de transmisión de balizas	250m	250m	1000m	1000m

Tabla 3.1: Ambiente de simulación de los experimentos de validación.

	Media \bar{X}	Desviación Estándar σ	Intervalos de Confianza	
			Máximo	Mínimo
DV-Hop	0.542	0.0083	0.547	0.537
Amorphous	0.315	0.0052	0.318	0.311
Centroid	1.105	0.0280	1.123	1.088
APIT	1.228	0.0693	1.271	1.185

Tabla 3.2: Resultados de los experimentos de validación.

de tener densidad de al menos 10 nodos por unidad de radio de transmisión. En lo que respecta a Centroid, se posicionaron las balizas estratégicamente y se configuró el radio de transmisión de las balizas con un valor mayor al de los nodos, de tal manera que se lograra una cobertura de nodos de al menos el 90%. El escenario de APIT satisface las precondiciones de densidad uniforme de nodos y rango de transmisión mayor por parte de las balizas. Para todos los algoritmos se empleó la versión 2.34 de NS-2, 802.11b como modelo de capa física, el modelo de propagación TwoRayGround (TRG) en un plano de $1000m \times 1000m$, rango de transmisión de los nodos con valor de $250m$ y una distribución uniforme de los nodos. El resto de los parámetros empleados se desgolzan en la Tabla 3.1.

Los resultados de los experimentos de validación realizados se muestran en la Tabla 3.2. Se obtuvo la *Media* \bar{X} , la *Desviación Estándar* σ y los *Intervalos de Confianza* (máximo y mínimo) de cada prueba experimental de validación correspondiente a cada algoritmo. El nivel de confianza fue del 95% y los resultados obtenidos fueron normalizados con respecto al radio de transmisión R .

Los resultados derivados de las pruebas de validación que se muestran en la Tabla 3.2 concuerdan con proximidad con los resultados presentados en las publicaciones de las propuestas iniciales [38][37][10][21]. Es importante señalar que los resultados originales no incluyeron en su pruebas experimentales los efectos de la capa física, los cuales si se incluyen en las pruebas de validación, y por consecuencia se ven reflejados en los resultados que se presentan en esta sección. Por lo tanto, de acuerdo a lo antes descrito, se considera que los resultados obtenidos y presentados en este trabajo validan las implementaciones de los algoritmos.

3.4.2. Resultados experimentales

En esta sección se presentan los resultados comparativos de las simulaciones de las versiones distribuidas de DV-Hop, Amorphous, Centroid y APIT. Los experimentos

fueron ejecutados utilizando a IEEE 802.11 DCF [15] 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* y *sobrecarga*. 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, y la sobrecarga mide el número total promedio de paquetes transmitidos por nodo, incluyendo balizas. Esta última métrica cuantifica la cantidad de recursos (ancho de banda, memoria, ciclos de CPU) empleados para estimar la posición de los nodos.

Se empleó la versión 2.34 del simulador de eventos discretos NS-2 [50], 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 periodo de tres segundos para actualizar su información de localización. Se empleó Random WayPoint (RW) como modelo de movilidad. Las velocidades de los nodos varían aleatoriamente de 1 a 20 m/s (de 3.6 a 72 km/h) con un tiempo de pausa de 10 segundos. Este rango de velocidades es empleado para cubrir desde velocidades de peatones hasta vehiculares.

En la sección 3.4.2.1 se presentan los resultados cuando los nodos son localizados en un plano bidimensional y las señales de radio son propagadas conforme al modelo de propagación TwoRayGround (TRG), y en la sección 3.4.2.2 cuando los nodos son localizados en un espacio tridimensional y las señales de radio son propagadas conforme al modelo de propagación Durkin [18] que considera los efectos de terrenos irregulares.

3.4.2.1. Posicionamiento en dos dimensiones

En esta sección se presentan los resultados de una serie de experimentos donde se evaluó el efecto de la movilidad y el número de balizas (o nodos que conocen *a priori* su posición) sobre el desempeño de las versiones 2D de los diferentes protocolos cuando se propaga la señal de radio de acuerdo al modelo de propagación TwoRayGround (TRG) y cuando los nodos móviles siguen el modelo de movilidad Random WayPoint (RW) en un plano de 1000m \times 1000m. En ambos casos, tanto los nodos regulares como las balizas están configurados con un rango de transmisión de 250m. La Tabla 4.6 lista los detalles del ambiente de simulación. En las implementaciones de DV-Hop y Amorphous usadas en estos experimentos, los nodos seleccionan las tres balizas más cercanas en saltos que no son colineales.

Las Figuras 3.3(a-i) muestran los resultados obtenidos en tres diferentes escenarios donde se incrementa el número de nodos móviles. En el Escenario 1-2D, los nodos y balizas son estáticos; en el Escenario 2-2D, las balizas son estáticas y los nodos son móviles; en el Escenario 3-2D, las balizas y los nodos son móviles. En todos los escenarios se incrementa el número de balizas con valores de 3, 7, 15 y 31.

En las Figuras 3.3(a-c) también se puede observar, que a medida que se aumenta el número de balizas, el error de localización reportado por Dv-Hop y Amorphous decrementa. 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 balizas. Como el número de balizas incrementa, la probabilidad de encontrar balizas cercanas también incrementa y por lo tanto el error de estimación disminuye.

Otro resultado intuitivo mostrado en las Figuras 3.3(a-c) es el hecho de que el error de estimación conseguido por Centroid y APIT es menos sensible al número de balizas. Por otro lado, a medida que se aumenta el número de nodos móviles, el error de estimación de todos los protocolos también aumenta. Esto es más evidente en los protocolos DV-Hop y Amorphous que dependen en mayor medida de la información topológica porque la movilidad tiende a reducir la precisión de la información topológica y la ubicación de los nodos disponibles.

Las Figuras 3.3(g-i) muestran la sobrecarga inducida por los diferentes protocolos. Estos resultados experimentales son consistentes con el análisis de la complejidad de la red presentado en la sección 1.3. Como era de esperarse, la sobrecarga aumentó a medida que el número de balizas incrementó debido a que las balizas son quienes inician el proceso de diseminación de información de control. En el caso de Centroid y APIT esta información se transmite sólo a sus uno-vecinos, mientras que DV-Hop y Amorphous inundan toda la red haciéndolos mucho más costosos en términos de consumo de energía, contención y congestión. El protocolo que más recursos consume es DV-Hop ya que tiene que inundar la red dos veces cada periodo de actualización. La primera vez para informar, a cada nodo en la red, su distancia en saltos hacia la baliza así como la posición actual de ésta, y la segunda vez para difundir el promedio de longitud de un salto. Es importante señalar que la sobrecarga también tiene un impacto negativo sobre el error de localización reportado por DV-Hop y Amorphous debido a que más paquetes se pierden a causa de las colisiones y congestión de las colas. Esto último provoca errores al momento de calcular las distancias en saltos hacia las balizas.

3.4.2.2. Posicionamiento en tres dimensiones

En esta sección se presentan los resultados de una serie de experimentos donde se evalúa el efecto de movilidad y número de balizas sobre el desempeño de las versiones 3D de los diferentes protocolos cuando se propaga la señal de radio de acuerdo al modelo de propagación Durkin [18] y cuando los nodos móviles siguen el modelo de movilidad Random WayPoint en un plano de $1000\text{m} \times 1000\text{m} \times 200\text{m}$. El tipo de terreno utilizado es *ravine*, y es proporcionado por [1]. Para estos experimentos se utilizó la versión 2.31 de NS2 porque el modelo Durkin fue implementado y evaluado para esta versión. Similar a 2D, las versiones 3D de DV-Hop y Amorphous empleadas en estos experimentos, seleccionan las cuatro balizas no coplanares más cercanas.

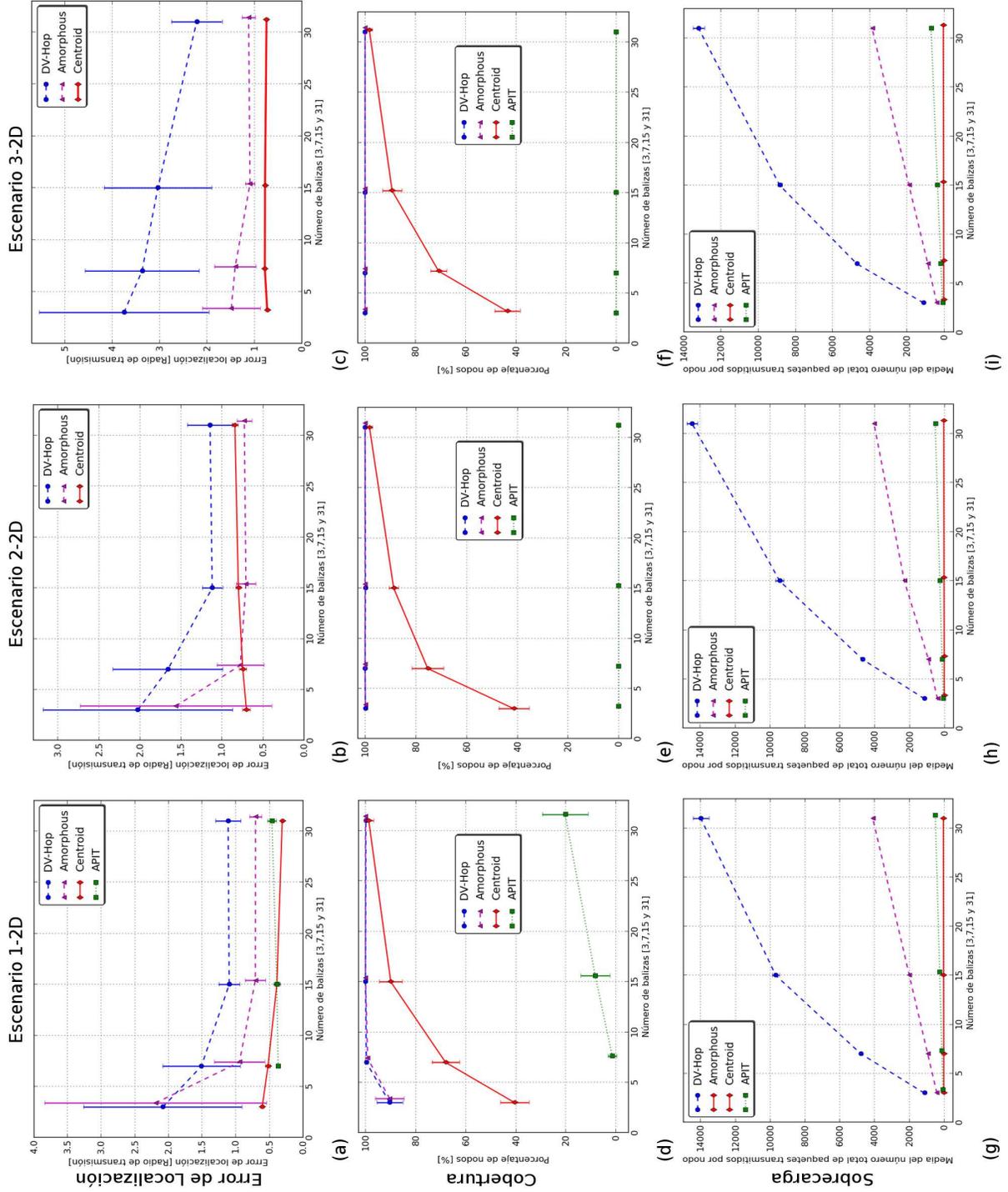


Figura 3.3: Efecto de movilidad y número de balizas cuando se utiliza un modelo de propagación 2D.

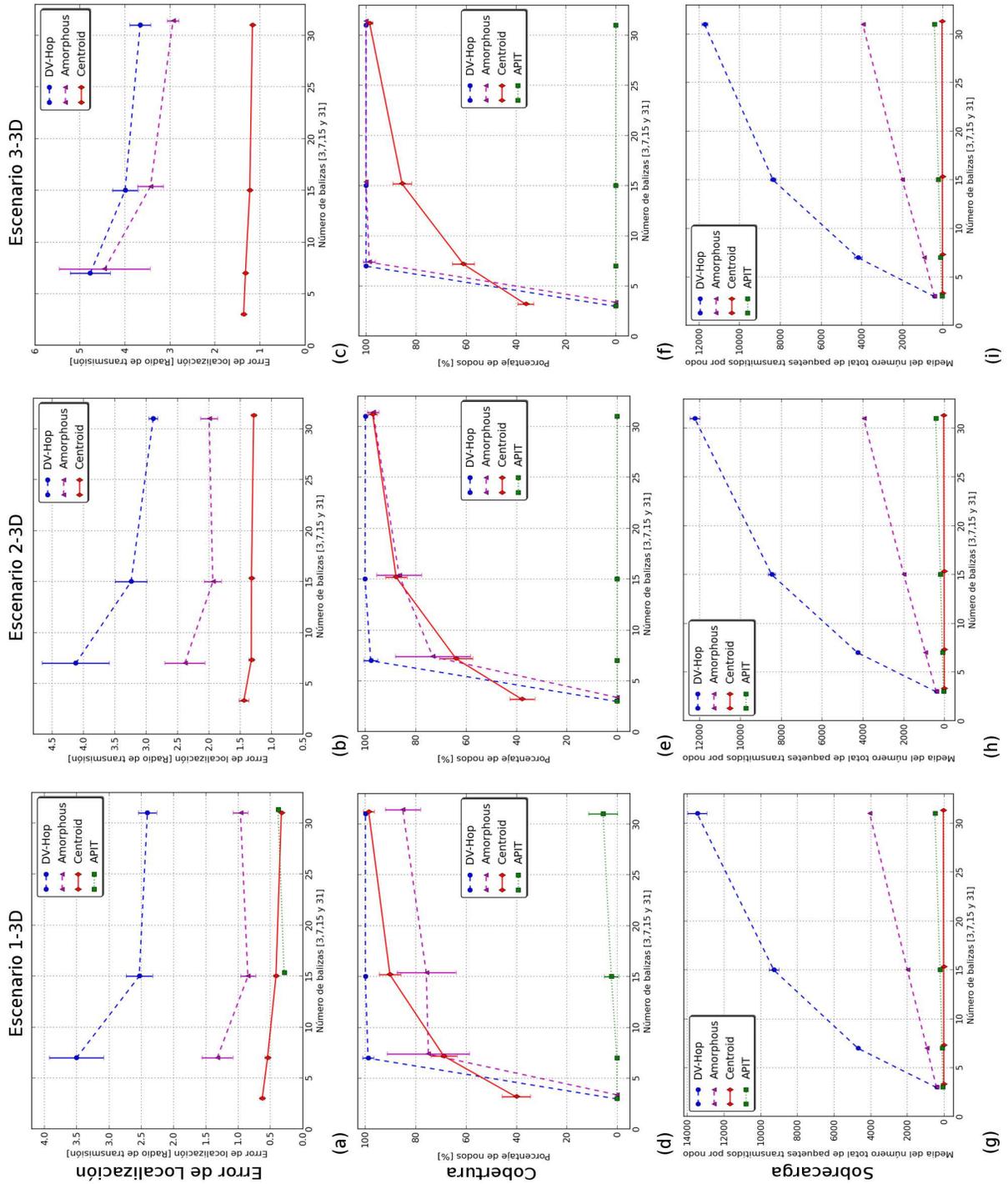


Figura 3.4: Efecto de movilidad y número de balizas cuando se utiliza un modelo de propagación 3D.

A menos que se indique lo contrario, los parámetros de simulación restantes son los mismos que los presentados en la Sección 3.4.2.1.

Las Figuras 3.4(a-i) muestran los resultados obtenidos en tres diferentes escenarios donde se incrementa el número de nodos móviles. En el Escenario 1-3D, los nodos y balizas son estáticos; en el Escenario 2-3D, las balizas son estáticas y los nodos son móviles; en el Escenario 3-3D, las balizas y los nodos son móviles. En todos los escenarios se incrementa el número de balizas con valores de 3, 7, 15 y 31.

Las Figuras 3.4(a-c) muestran el error de localización reportado por los diferentes protocolos. Como se puede observar en las figuras, las tendencias son similares a los observadas en el caso 2D, es decir, el desempeño de Centroid es mucho mejor que DV-Hop y Amorphous, siendo el algoritmo DV-Hop el que produjo el peor desempeño. El algoritmo APIT se desempeña bien sólo en condiciones estáticas y cuando el número de balizas es mayor a 7.

Como se muestra en las Figuras 3.4(d-f), la cobertura alcanzada por los algoritmos fue menor que la de los experimentos 2D. Las razones son las siguientes. Dado que la red se compone de los mismos 100 nodos ubicados en un volumen de $1000\text{m} \times 1000\text{m} \times 200\text{m}$, la densidad de los nodos y el promedio del tamaño del uno-vecindario de estos escenarios son más bajos en comparación a los escenarios 2D. Esto último también implica una reducción en el promedio del número de balizas en el uno-vecindario de los nodos, lo cual afecta en particular el desempeño de los algoritmos, tal como APIT, que requiere información de localización de al menos cuatro balizas ubicadas a un salto de distancia. Por tal razón, los nodos que ejecutan APIT fueron capaces de estimar posiciones únicamente en el escenario estático (Figura 3.4(d)) con 15 o más balizas. En general, el hecho de que la densidad de nodos disminuya implica un aumento de la distancia promedio de los nodos hacia las balizas, lo cual reduce la calidad de la información topológica a disposición de los nodos.

Por último, como se muestra en las Figuras 3.4(g-i), la sobrecarga inducida por las versiones 3D de los algoritmos es completamente análoga a la de sus homólogos 2D.

3.5. Conclusiones

En este trabajo se presentó un análisis detallado basado en simulaciones de cuatro de los algoritmos de posicionamiento más representativos para MANETs. Los algoritmos son: DV-Hop, Amorphous, Centroid y APIT. En el análisis experimental se consideraron escenarios con diferentes modelos de propagación de señal de radio, así como un número incremental de balizas y la movilidad de los nodos. Los resultados revelaron que debido a su simplicidad, Centroid es más robusto a las diferentes condiciones de la red. Sin embargo, ya que Centroid sólo utiliza referencias ubicadas dentro del radio de transmisión de los nodos; reporta significativamente menor cobertura que DV-Hop y Amorphous, los cuales pueden estimar posiciones en base a referencias ubicadas a muchos saltos de distancia de los nodos.

Los resultados también mostraron que la prueba PIT es bastante sensible a la movilidad de los nodos y los nodos que ejecutan APIT son incapaces de estimar posiciones cuando las

balizas y los nodos son móviles. También es evidente que DV-Hop y Amorphous sufren de las deficiencias del método de trilateración, el cual no fue diseñado para hacer frente a las estimaciones de distancias imprecisas hacia las referencias. En general, los protocolos que inundan toda la red, tales como DV-Hop y Amorphous, consiguen una mayor cobertura en comparación a los protocolos Centroid y APIT que transmiten únicamente a sus uno-vecinos. No obstante, los dos primeros son más costosos en términos de utilización del ancho de banda.

Capítulo 4

Multilateración Probabilística

4.1. Introducción

El método tradicional de trilateración es presentado por la literatura como una técnica empleada para determinar la posición de un objeto o nodo¹. Para ello se requiere de información de localización de al menos tres referencias o balizas¹ así como también conocer las distancias exactas hacia ellas. Existen algunos algoritmos de posicionamiento en MANETs como DV-Hop y Amorphous que utilizan esta técnica para estimar la posición de sus nodos. Sin embargo, en estos esquemas, 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 balizas, 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, deficiencias expuestas e ilustradas de manera anticipada en el Capítulo 3. En relación a esto, existen diversos trabajos seminales [60][41][46][4] enfocados a mitigar las deficiencias de trilateración, no obstante, éstos no han logrado tener mayor impacto. En este capítulo se introduce una técnica novedosa llamada *multilateración probabilística*. Esta técnica es usada para estimar la posición de un objeto o nodo¹ basada en la posición de tres o más referencias o balizas¹ y las distancias estimadas de manera imprecisa hacia ellas. El objetivo de esta técnica es el de resolver las deficiencias del método de trilateración expuestas previamente.

4.2. Trilateración

El método de trilateración es empleado para determinar la posición de un nodo usando las estimaciones de las distancias entre él y varias balizas [51][36]. Mediante trilateración se puede calcular la posición de un nodo en 2D y 3D. Para calcular la posición en 2D es

¹Terminología empleada en el contexto de posicionamiento en MANETs.

necesario conocer las distancias de al menos tres balizas no colineales, mientras que para calcular posición en 3D es necesario conocer las distancias de al menos cuatro balizas no coplanares.

Matemáticamente, la posición de un nodo en 2D se obtiene resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones [49]:

$$\begin{aligned}(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 &= d_1^2 \\(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 &= d_2^2 \\(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 &= d_3^2\end{aligned}$$

Este sistema de ecuaciones cuadráticas se convierte a un sistema de ecuaciones lineales mediante una sustitución y substracción como se muestra a continuación:

$$2(x_2 - x_1) \cdot x + 2(y_2 - y_1) \cdot y = \alpha \quad (4.1)$$

$$2(x_3 - x_1) \cdot x + 2(y_3 - y_1) \cdot y = \beta \quad (4.2)$$

donde,

$$\begin{aligned}\alpha &= (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) \\ \beta &= (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2)\end{aligned}$$

Similarmente, el sistema de ecuaciones cuadráticas correspondiente a la versión 3D es:

$$\begin{aligned}(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 &= d_1^2 \\(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 &= d_2^2 \\(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 &= d_3^2\end{aligned}$$

donde,

$$2(x_2 - x_1) \cdot x + 2(y_2 - y_1) \cdot y + 2(z_2 - z_1) \cdot z = \alpha \quad (4.3)$$

$$2(x_3 - x_1) \cdot x + 2(y_3 - y_1) \cdot y + 2(z_3 - z_1) \cdot z = \beta \quad (4.4)$$

$$2(x_4 - x_1) \cdot x + 2(y_4 - y_1) \cdot y + 2(z_4 - z_1) \cdot z = \gamma \quad (4.5)$$

En Trilateración 2D, la posición de un nodo $P(x, y)$ se calcula resolviendo las ecuaciones 4.1 y 4.2 usando las siguientes operaciones de matrices:

$$x = f(d_1, d_2, d_3) = \frac{\begin{vmatrix} \alpha & 2Y_1^2 \\ \beta & 2Y_1^3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2X_1^2 & 2Y_1^2 \\ 2X_1^3 & 2Y_1^3 \end{vmatrix}}$$

$$y = g(d_1, d_2, d_3) = \frac{\begin{vmatrix} 2X_1^2 & \alpha \\ 2X_1^3 & \beta \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2X_1^2 & 2Y_1^2 \\ 2X_1^3 & 2Y_1^3 \end{vmatrix}}$$

donde X_j^i y Y_j^i hace referencia a $(x_i - x_j)$ y $(y_i - y_j)$ respectivamente.

En Trilateración 3D, la estimación de la posición de un nodo $P(x, y, z)$ se obtiene resolviendo las ecuaciones 4.3, 4.4 y 4.5 como sigue:

$$x = f(d_1, d_2, d_3, d_4) = \frac{\begin{vmatrix} \alpha & 2Y_1^2 & 2Z_1^2 \\ \beta & 2Y_1^3 & 2Z_1^3 \\ \gamma & 2X_1^4 & 2Z_1^4 \end{vmatrix}}{M}$$

$$y = g(d_1, d_2, d_3, d_4) = \frac{\begin{vmatrix} 2X_1^2 & \alpha & 2Z_1^2 \\ 2X_1^3 & \beta & 2Z_1^3 \\ 2X_1^4 & \gamma & 2Z_1^4 \end{vmatrix}}{M}$$

$$z = h(d_1, d_2, d_3, d_4) = \frac{\begin{vmatrix} 2X_1^2 & 2Y_1^2 & \alpha \\ 2X_1^3 & 2Y_1^3 & \beta \\ 2X_1^4 & 2Y_1^4 & \gamma \end{vmatrix}}{M}$$

donde,

$$M = \begin{vmatrix} 2X_1^2 & 2Y_1^2 & 2Z_1^2 \\ 2X_1^3 & 2Y_1^3 & 2Z_1^3 \\ 2X_1^4 & 2Y_1^4 & 2Z_1^4 \end{vmatrix}$$

Finalmente, una matriz de 3×3 se resuelve utilizando la regla de Cramer como se especifica a continuación:

$$C = \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{vmatrix} = c_{11} \cdot \begin{vmatrix} c_{22} & c_{23} \\ c_{32} & c_{33} \end{vmatrix} - c_{12} \cdot \begin{vmatrix} c_{21} & c_{23} \\ c_{31} & c_{33} \end{vmatrix} + c_{13} \cdot \begin{vmatrix} c_{21} & c_{22} \\ c_{31} & c_{32} \end{vmatrix}$$

4.3. Multilateración probabilística

En esta sección se presenta el método de *multilateración probabilística*. Esta es una técnica novedosa orientada a estimar la ubicación de un nodo, basada en la posición de tres o más balizas y distancias estimadas hacia ellas. El objetivo del método propuesto es el de resolver las deficiencias del método de trilateración como la incertidumbre, no consistencia y ambigüedad [60], que surgen cuando la información de la ubicación de las balizas o las estimaciones de las distancias hacia ellas no son exactas.

El método multilateración probabilística define para cada baliza β una función de densidad de probabilidad $\mathbf{P}_\beta(x, y)$ que asigna a cada punto en el plano (o espacio) una probabilidad de encontrar un nodo. Dado que las posiciones reales de las balizas 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 $\mathbf{P}_i(x, y)$, también es independiente de la probabilidad definida por otra función $\mathbf{P}_j(x, y)$ para el mismo punto. Por lo tanto, como se muestra en la Ecuación 4.6, 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.

$$\mathbf{P}_B(x, y) = \prod_{i=1}^n \mathbf{P}_i(x, y) \quad (4.6)$$

La posición estimada por el método multilateración probabilística es el punto (x, y) donde $\mathbf{P}_B(x, y)$ tiene su máximo.

4.3.1. Estimación de posición en 2D

En este capítulo se propone la función de densidad de probabilidad definida en la Ecuación 4.7 que se basa en una función Gaussiana con parámetros μ y σ . En la Ecuación 4.7, x_β y y_β son las coordenadas de la posición de la baliza β , μ_β es la distancia estimada a la baliza β , σ_β es proporcional al error de estimación de la distancia hacia la baliza β y \mathcal{N}_β es una constante de normalización. Como se puede ver en la Ecuación 4.7, la probabilidad de encontrar un nodo en un punto dado en el plano es simplemente una función de su distancia a las balizas. La Figura 4.1(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 .

$$\mathbf{P}_\beta(x, y) = \frac{1}{\mathcal{N}_\beta} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\sqrt{(x-x_\beta)^2 + (y-y_\beta)^2} - \mu_\beta}{\sigma_\beta} \right]^2} \quad (4.7)$$

Con información de un conjunto B de tres o más balizas, se puede sustituir la Ecuación 4.7 en la Ecuación 4.6 para obtener la función de densidad de probabilidad (pdf) definida en la Ecuación 4.8. La Figura 4.1(b) muestra una gráfica de tres pdfs superpuestas definida por la información de tres balizas, mientras que la Figura 4.1(c) muestra una gráfica del producto de tres pdfs que tiene un único máximo que será la posición calculada por el método multilateración probabilística.

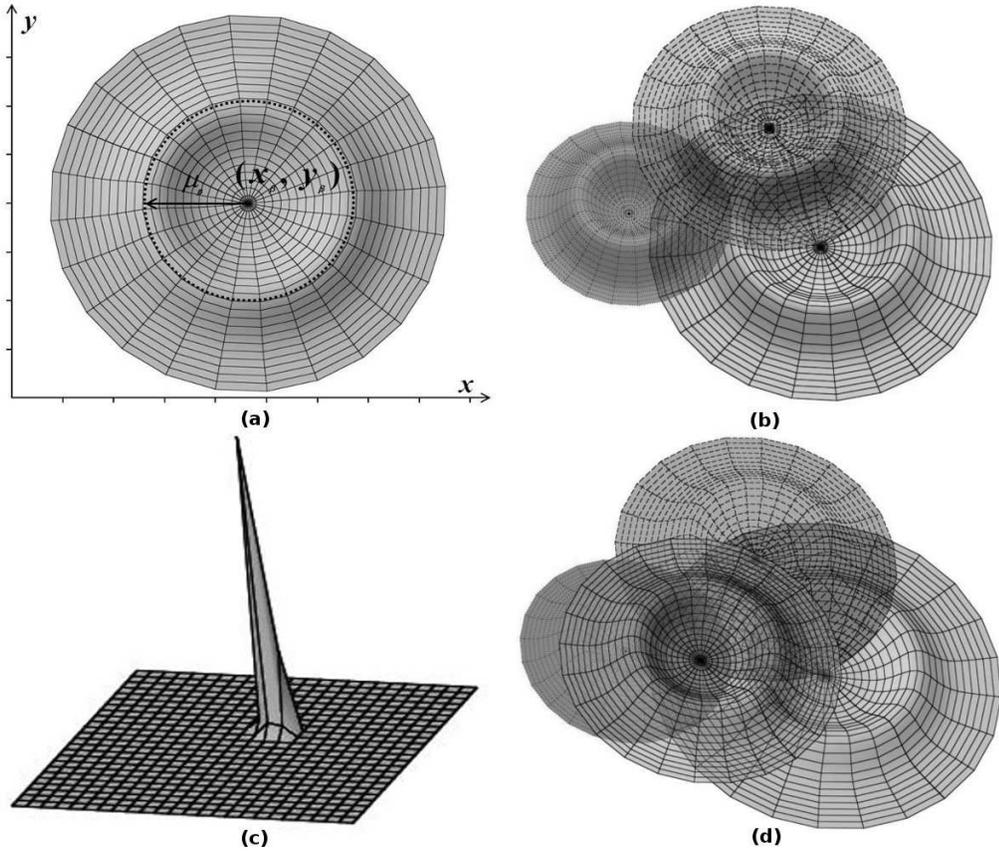


Figura 4.1: Multilateración probabilística usando funciones Gaussianas. (a) Función de densidad de probabilidad definida para una baliza β . (b) Superposición de tres funciones de probabilidad. Cada una definida por una baliza diferente. (c) Función de densidad de probabilidad de localización de un nodo dadas tres balizas. (d) Superposición de cuatro funciones de densidad de probabilidad.

$$\mathbf{P}_B(x, y) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\mathcal{N}_i} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \mu_i}{\sigma_i} \right]^2} \quad (4.8)$$

Con el fin de encontrar el máximo de la Ecuación 4.8, se calculan las soluciones de las derivadas parciales (Ecuaciones 4.9 and 4.10) de la Ecuación 4.8. Sin embargo, ya que las Ecuaciones 4.9 y 4.10 son igual a cero sólo si la última sumatoria es igual a cero, sólo se tiene que resolver simultáneamente las Ecuaciones 4.15 y 4.16. Esto último representa lo mismo que la solución de la Ecuación 4.13 donde las Ecuaciones 4.15 y 4.16 se elevan al cuadrado y luego se suman.

$$\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{P}_B(x, y) = \left[\prod_{i=1}^n \frac{1}{\mathcal{N}_i} \right] \left[e^{\sum_{i=1}^n -\frac{1}{2} \left[\frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \mu_i}{\sigma_i} \right]^2} \right] \left[- \sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \mu_i)(x-x_i)}{\sigma_i \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} \right] \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \mathbf{P}_B(x, y) = \left[\prod_{i=1}^n \frac{1}{\mathcal{N}_i} \right] \left[e^{\sum_{i=1}^n -\frac{1}{2} \left[\frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \mu_i}{\sigma_i} \right]^2} \right. \\ \left. \left[- \sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \mu_i)(y-y_i)}{\sigma_i \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} \right] \right] \quad (4.10)$$

$$0 = \sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \mu_i)(x-x_i)}{\sigma_i \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} \quad (4.11)$$

$$0 = \sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \mu_i)(y-y_i)}{\sigma_i \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} \quad (4.12)$$

$$0 = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \mu_i)(x-x_i)}{\sigma_i \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} \right]^2 + \\ \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \mu_i)(y-y_i)}{\sigma_i \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} \right]^2 \quad (4.13)$$

Por último se puede emplear el método de Newton [?], con el centro de gravedad de las posiciones de las balizas como punto de partida para encontrar la raíz de la Ecuación 4.13. Es importante señalar que el método de Newton converge cuadráticamente si la derivada de la Ecuación 4.13 es continua y no cero en el vecindario de la raíz.

4.3.2. 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 balizas. En tres dimensiones, la función de densidad de probabilidad basada en funciones Gaussianas, definida por un conjunto de n balizas está dada por la Ecuación 4.14.

$$\mathbf{P}_B(x, y) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\mathcal{N}_i} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \mu_i}{\sigma_i} \right]^2} \quad (4.14)$$

$$0 = \sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \mu_i)(x-x_i)}{\sigma_i \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}} \quad (4.15)$$

$$0 = \sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \mu_i)(y-y_i)}{\sigma_i \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}} \quad (4.16)$$

$$0 = \sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \mu_i)(z-z_i)}{\sigma_i \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}} \quad (4.17)$$

A partir de la Ecuación 4.14 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 4.15, 4.16 y 4.17 se tienen que resolver simultáneamente para encontrar los puntos que maximizan la Ecuación 4.14. Al igual que en 2D, este problema es equivalente a la de encontrar las raíces de la Ecuación 4.18 que también se pueden obtener usando el método de Newton [?].

$$0 = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \mu_i)(x-x_i)}{\sigma_i^2 \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}} \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \mu_i)(y-y_i)}{\sigma_i^2 \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}} \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \mu_i)(z-z_i)}{\sigma_i^2 \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}} \right]^2 \quad (4.18)$$

4.3.3. Propiedades

El método de multilateración probabilística tiene un número de propiedades deseables que contrastan con las deficiencias del método tradicional de trilateración.

- **Consistencia:** El método de multilateración probabilística puede incorporar sin problemas la información de un número arbitrario de balizas; por lo tanto, si hay disponible un gran número de balizas, no es necesario seleccionar un subconjunto de ellas con el fin de producir una estimación.
- **Resistencia a la colinealidad:** Los resultados experimentales muestran que el método de multilateración probabilística puede producir estimaciones de posición razonablemente exactas aún si las balizas son casi colineales o casi coplanares.
- **Certidumbre:** Los resultados experimentales muestran que la mayoría de las veces la función de densidad de probabilidad definida por la Ecuación 4.7 es unimodal en la región definida por las posiciones de las balizas. Por otro lado, aún en los casos en que esta región tenga más de un máximo, los resultados reportados por el método probabilístico son más precisos que los del método de trilateración.

4.4. Trilateración vs Multilateración Probabilística

En esta sección se presenta un análisis comparativo entre los métodos trilateración y multilateración probabilística. El propósito es cuantificar, bajo las mismas circunstancias, la eficiencia de los métodos en términos de exactitud y precisión. Los métodos fueron sometidos a una evaluación teórica y experimental. Los detalles que caracterizan cada evaluación se describen en su respectiva sección.

4.4.1. Análisis comparativo teórico

En esta sección se proponen dos ejercicios comparativos entre trilateración y multilateración probabilística. El primer ejercicio para caracterizar diferentes estados de error y el segundo ejercicio para evaluar diferentes niveles de colinealidad y coplanaridad. En su respectiva sección se explicará a detalle en qué consiste cada ejercicio.

4.4.1.1. Ejercicio comparativo 1

El primer ejercicio consiste en caracterizar los diferentes estados que pueden incurrir un nodo y tres balizas al estimar posición en un espacio bidimensional. A continuación se describen los estados que se consideran más representativos, los cuales permiten destacar las cualidades y las limitaciones de ambos métodos. Asimismo se presentan, en cada estado, los resultados de los cálculos matemáticos de ambos métodos y se realiza una breve descripción de los mismos.

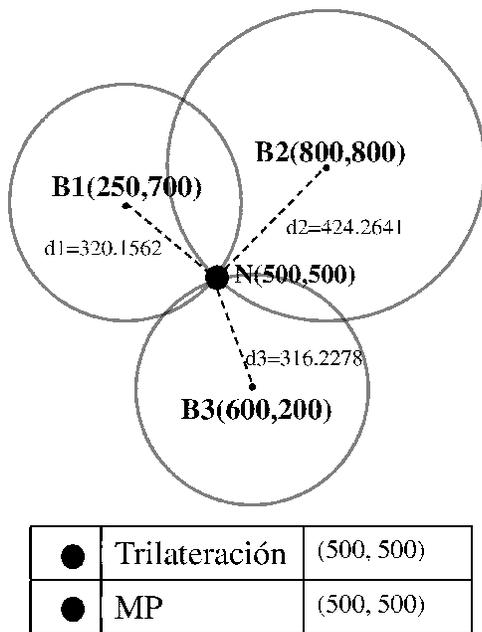


Figura 4.2: Estado 1. Estado ideal para estimar la posición de un nodo mediante trilateración y multilateración probabilística.

Estado 1. La Figura 4.2 ejemplifica el estado perfecto de trilateración y multilateración probabilística. Cuando un nodo logra determinar o conoce las distancias exactas hacia las balizas, los métodos matemáticos de trilateración y multilateración probabilística pueden determinar con exactitud su posición. El ejemplo mostrado incluye tres balizas con coordenadas $B1(250,700)$, $B2(800,800)$ y $B3(600,200)$, y distancias $d1=320.1562$, $d2=424.2641$ y $d3=316.2278$ del nodo N hacia cada una de ellas. Con esta información de entrada, ambos métodos producen la misma información de salida, estiman la posición del nodo N en las coordenadas $(500,500)$. El resultado de ambos métodos corresponde, en la gráfica, al punto de intersección de tres circunferencias con centro en $B1$, $B2$ y $B3$, y radios $d1$, $d2$, y $d3$.

Para facilitar la descripción de los estados enumerados del 2 al 7 se empleará el concepto de circunferencia. A cada circunferencia le corresponde la posición de una baliza B como centro, mientras que su radio equivale a la distancia d entre un nodo N y dicha baliza. Asimismo, para todos los estados, se supone la posición real del nodo N en las coordenadas $(500,500)$. El error de localización es denotado por δ y representa la distancia euclidiana entre la posición real del nodo N y la posición estimada del mismo. Por último, el objetivo en cada uno de los estados es estimar la posición del nodo N empleando la misma información de entrada tanto para el método de trilateración como multilateración

probabilística.

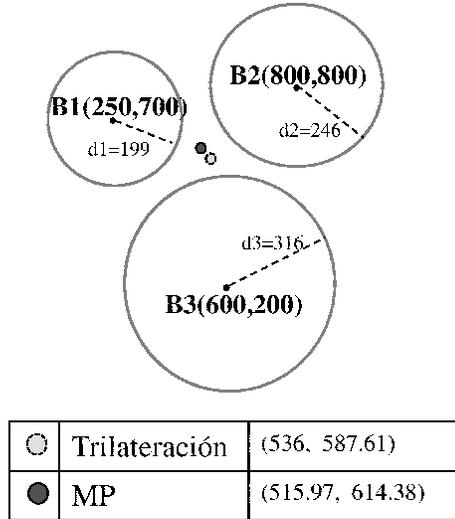


Figura 4.3: Estado 2. Estado en el que las tres circunferencias no intersecan en ningún punto.

Estado 2. El estado que caracteriza la Figura 4.3 donde no existe intersección de las circunferencias es considerado en ambos métodos como un estado de ambigüedad. Este tipo de error se debe principalmente a la subestimación de distancias debido a la mala precisión de la técnica empleada para ello. Los datos de entrada para ambos métodos son las coordenadas de tres balizas B1(250,700), B2(800,800) y B3(600,200), y los valores $d_1=199$, $d_2=246$ y $d_3=316$ que corresponden a las distancias existentes entre el nodo N y cada baliza. La posición (x,y) que estima trilateración para el nodo N es de (536,587.61) mientras que por multilateración probabilística es de (515.97,614.38). Los errores generados $\delta = 94.7181$ y $\delta = 115.4895$ indican que para este caso particular trilateración estima mejor posición que multilateración probabilística.

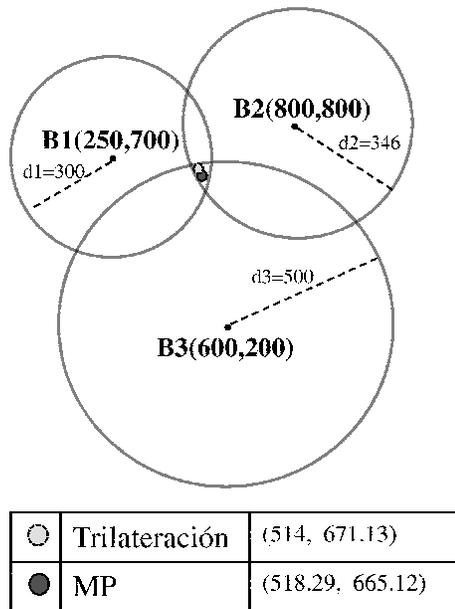


Figura 4.4: Estado 3. Estado donde tres circunferencias intersecan en más de un punto.

Estado 3. La Figura 4.4 muestra un estado donde las circunferencias intersecan en seis puntos. Este es un estado de error muy común que se genera cuando la técnica empleada para estimar las distancias entre un nodo y las balizas es imprecisa, en este caso las distancias son sobreestimadas. Los datos de entrada para ambos métodos son las coordenadas de tres balizas B1(250,700), B2(800,800) y B3(600,200), y los valores $d_1=300$, $d_2=346$ y $d_3=500$ que corresponden a las distancias existentes entre el nodo N y cada baliza. La posición (x,y) que estima trilateración para el nodo N es de (514,671.13) mientras que por multilateración probabilística es de (518.29,665.12). Los errores alcanzados $\delta = 171.7017$ y $\delta = 166.1299$ indican que para este escenario específico, multilateración probabilística estima mejor posición que trilateración.

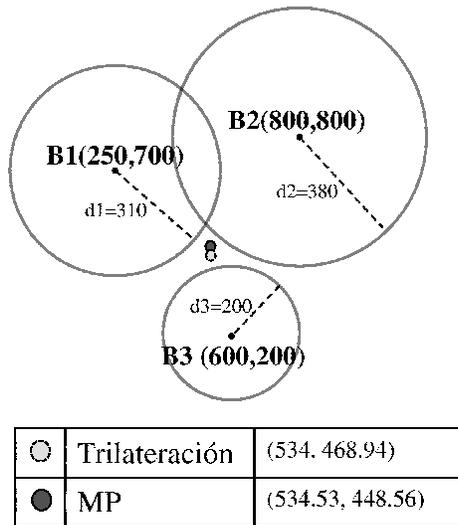


Figura 4.5: Estado 4. Estado que visualiza la intersección únicamente de un par de circunferencias.

Estado 4. La Figura 4.5 ilustra el estado donde un par de circunferencias se intersecan en dos puntos. En la imagen se pueden visualizar simultáneamente los fenómenos de sobreestimación y subestimación producidos por una ineficiente estimación de distancias. Los datos de entrada para ambos métodos son las coordenadas de tres balizas B1(250,700), B2(800,800) y B3(600,200), y los valores $d_1=310$, $d_2=380$ y $d_3=200$ que corresponden a las distancias existentes entre el nodo N y cada baliza. La posición (x,y) que estima trilateración para el nodo N es de (534,468.94) mientras que por multilateración probabilística es de (534.53,448.56). Los errores alcanzados $\delta = 46.0513$ y $\delta = 61.9548$ indican que para este escenario concreto, trilateración estima mejor posición que multilateración probabilística.

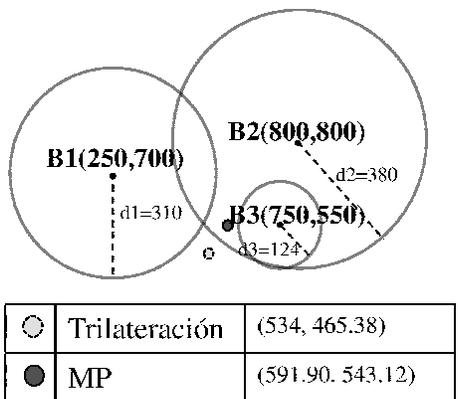


Figura 4.6: Estado 5. Estado que caracteriza una circunferencia circunscrita en otra y la intersección de un par de circunferencias.

Estado 5. La Figura 4.6 presenta el estado donde una circunferencia está circunscrita en otra, y las dos circunferencias mayores se intersecan entre sí. Este es otro caso donde se puede apreciar claramente los fenómenos de sobreestimación y subestimación de distancias. Los datos de entrada para ambos métodos son las coordenadas de tres balizas B1(250,700), B2(800,800) y B3(750,550), y los valores $d_1=310$, $d_2=380$ y $d_3=124$ que corresponden a las distancias existentes entre el nodo N y cada baliza. La posición (x,y) que estima trilateración para el nodo N es de (534,465.38) mientras que por multilateración probabilística es de (591.90,443.12). Los errores alcanzados $\delta = 48.5236$ y $\delta = 108.0784$ indican que para este ejemplo, trilateración estima mejor posición que multilateración probabilística.

4.4.1.2. Ejercicio comparativo 2

El segundo ejercicio de esta sección consiste en caracterizar diversos niveles colinealidad entre balizas en 2D y de coplanaridad entre balizas en 3D. Para ello se proponen los siguientes dos escenarios que se describen a continuación.

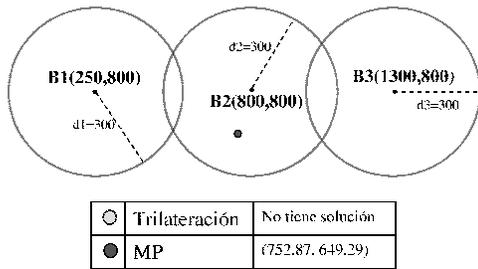


Figura 4.7: Estado 6. Estado que ilustra tres circunferencias colineales.

Estado 6. La Figura 4.7 muestra la colinealidad de tres circunferencias. La no colinealidad es una precondition de trilateración para estimar posición. Sin embargo, caracterizar esta situación permite destacar la cualidad que posee multilateración probabilística de no establecer esta precondition para estimar la posición de un nodo. La imagen muestra tres balizas ubicadas en las coordenadas B1(250,800), B2(800,800) y B3(1300,800) y distancias del nodo N hacia ellas con valores $d_1=300$, $d_2=300$ y $d_3=300$. La posición (x,y) estimada por trilateración para el nodo N no puede ser determinada mientras que la estimada por multilateración probabilística es de (752.87,649.29). Los resultados son cotendentes e indican que aún cuando exista colinealidad entre balizas, multilateración probabilística es el único método capaz de estimar posición, incluso con razonablemente buena precisión.

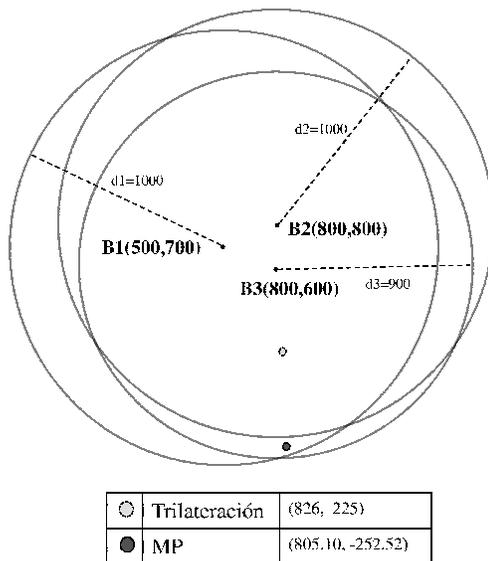
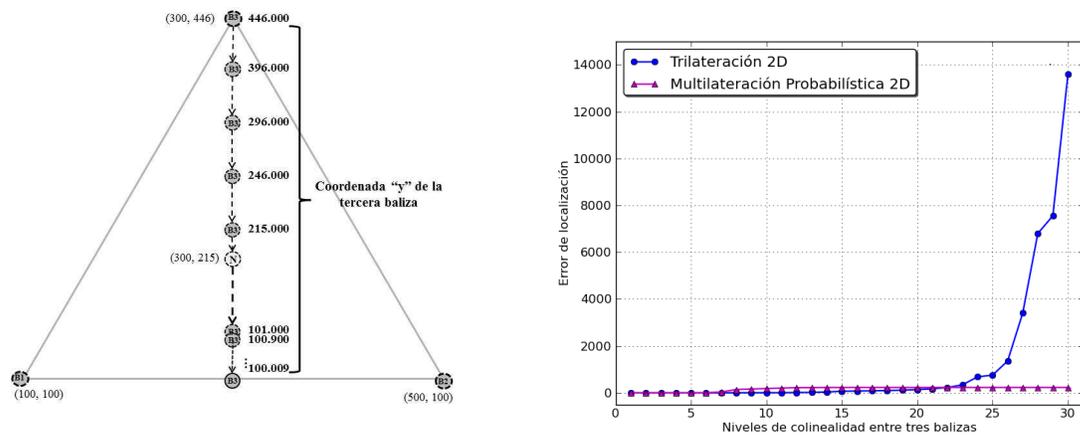


Figura 4.8: Estado 7. Estado que muestra tres circunferencias superpuestas.

Estado 7. La Figura 4.8 ilustra el estado donde tres circunferencias están superpuestas y con alto nivel de colinealidad. Los datos de entrada para ambos métodos son las coordenadas de tres balizas B1(500,700), B2(800,800) y B3(800,600), y los valores $d_1=1000$, $d_2=1000$ y $d_3=900$ que corresponden a las distancias existentes entre el nodo N y cada baliza. La posición (x,y) que estima trilateración para el nodo N es de (826,225) mientras que por multilateración probabilística es de (805.10,-252.52). Los errores alcanzados $\delta = 426.4985$ y $\delta = 812.0175$ indican que para este escenario, trilateración estima mejor posición que multilateración probabilística. En este ejemplo se exhibe la principal limitante de multilateración probabilística. Conforme se muevan las balizas en posiciones más cercanas en dirección al nodo que desea estimar su posición, el error de localización tiende a equivaler al valor del radio de la circunferencia más grande.

El primer escenario consiste en tres balizas B1, B2, y B3 ubicadas en las coordenadas (100,100), (500,100) y (300,446). Cada una de las balizas representa un vértice del triángulo que se muestra en la Figura 4.9(a). El ejercicio consiste en estimar la posición del nodo N usando como entrada los valores numéricos que se proporcionan en la Tabla 4.1. Estos valores representan diferentes niveles de colinealidad enumerados del 1 al 30, donde el nivel 30 significa colinealidad entre las tres balizas, como se especifica en la Figura 4.9(a). El error de localización es denotado por δ y representa la distancia euclidiana entre la posición real del nodo N y la posición estimada del mismo. La posición real del nodo N se supone como centroide del triángulo y tiene como coordenadas x y y (500,500).



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

Figura 4.9: Colinealidad entre balizas en un espacio bidimensional (2D).

La Figura 4.9(b) grafica los errores de localización alcanzados por cada método para cada uno de los niveles de colinealidad. La Tabla 4.2 despliega los valores calculados. Los resultados muestran claramente que el error de localización reportado por el método de trilateración tiende a ser un valor infinito cuando existe colinealidad entre las balizas. En lo que respecta al método de multilateración probabilística, el error de localización se mantiene constante en todos los niveles de colinealidad evaluados.

El segundo escenario consiste en cuatro balizas B1, B2, B3 y B4 ubicadas en las coordenadas (100,100,0), (500,100,0), (300,446,0) y (300,215,326). Cada una de las balizas representa un vértice del tetraedro que se muestra en la Figura 4.10(a). El ejercicio consiste en estimar la posición del nodo N usando como entrada los valores numéricos que se proporcionan en la Tabla 4.5. Estos valores representan diferentes niveles de coplanaridad enumerados del 1 al 28 donde el nivel 28 significa coplanaridad entre las cuatro balizas, como se especifica en la Figura 4.10(a). El error de localización es denotado por δ y representa la distancia euclidiana entre la posición real del nodo N y la posición estimada del mismo. La posición real del nodo N se supo-

Nivel	Coordenadas de las balizas						Distancias		
	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	d_3	d_2	d_3
1	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	446.000	231.000	231.000	231.000
2	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	396.000	231.000	231.000	181.000
3	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	346.000	231.000	231.000	131.000
4	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	296.000	231.000	231.000	81.000
5	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	246.000	231.000	231.000	31.000
6	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	215.000	231.000	231.000	0.000
7	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	196.000	231.000	231.000	19.000
8	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	146.000	231.000	231.000	69.000
9	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	136.000	231.000	231.000	79.000
10	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	126.000	231.000	231.000	89.000
11	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	116.000	231.000	231.000	99.000
12	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	106.000	231.000	231.000	109.000
13	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	104.000	231.000	231.000	111.000
14	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	102.000	231.000	231.000	113.000
15	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	101.000	231.000	231.000	114.000
16	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	100.900	231.000	231.000	114.100
17	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	100.800	231.000	231.000	114.200
18	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	100.700	231.000	231.000	114.300
19	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	100.600	231.000	231.000	114.400
20	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	100.500	231.000	231.000	114.500
21	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	100.400	231.000	231.000	114.600
22	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	100.300	231.000	231.000	114.700
23	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	100.200	231.000	231.000	114.800
24	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	100.100	231.000	231.000	114.900
25	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	100.090	231.000	231.000	114.910
26	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	100.050	231.000	231.000	114.950
27	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	100.020	231.000	231.000	114.980
28	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	100.010	231.000	231.000	114.990
29	100.000	100.000	500.000	100.000	300.000	100.009	231.00	231.000	114.991

Tabla 4.1: Valores de entrada empleados en la evaluación de la colinealidad entre balizas.

ne como centroide del tetraedro y tiene como coordenadas x , y y z los valores (300,215,81).

La Figura 4.10(b) muestra los errores de localización alcanzados por cada método para cada uno de los niveles de coplanaridad. En la Tabla 4.4 se publican los valores resultantes. De manera análoga los resultados en 2D, el método de trilateración 3D tiende a ser un valor infinito cuando existe coplanaridad entre las balizas, mientras que multilateración probabilística permanece constante en todos los niveles de coplanaridad evaluados.

4.4.2. Análisis comparativo experimental

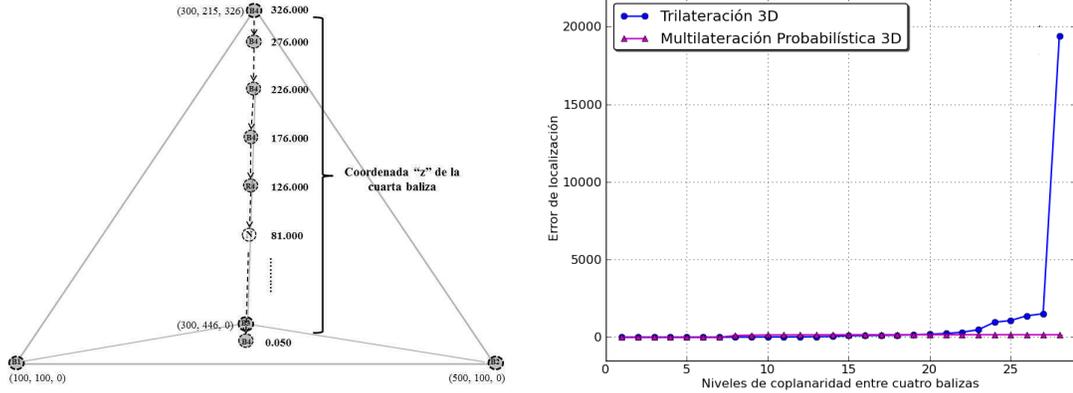
En esta sección se presentan los resultados comparativos de simulación de las versiones distribuidas de DV-Hop y Amorphous que utilizan el método de trilateración, así como las versiones modificadas de DV-Hop y Amorphous que utilizan el método de multilateración probabilística (MP).

Nivel	Trilateración			MP		
	x	y	δ	x	y	δ
1	300.000	215.000	0.000	300.000	215.000	0.000
2	300.000	215.230	0.230	300.000	215.166	0.166
3	300.000	215.280	0.280	300.000	215.130	0.130
4	300.000	215.350	0.350	300.000	215.088	0.088
5	300.000	215.470	0.470	300.000	215.037	0.037
6	300.000	215.590	0.590	300.000	215.000	0.000
7	300.000	215.710	0.710	300.00	177.976	37.024
8	300.000	216.480	1.480	300.00	74.803	140.197
9	300.000	216.890	1.890	300.000	53.002	161.998
10	300.000	217.620	2.620	300.00	32.098	182.902
11	300.000	219.250	4.250	300.000	12.626	202.374
12	300.000	226.360	11.360	300.000	-5.205	220.205
13	300.000	232.000	17.000	300.000	-8.573	223.573
14	300.000	249.000	34.000	300.000	-11.877	226.877
15	300.000	283.000	68.000	300.000	-13.505	228.505
16	300.000	290.560	75.560	300.00	-13.667	228.667
17	300.000	300.000	85.000	300.000	-13.829	228.829
18	300.000	312.140	97.140	300.000	-13.990	228.990
19	300.000	328.330	113.330	300.000	-14.152	229.152
20	300.000	351.000	136.000	300.000	-14.313	229.313
21	300.000	385.000	170.000	300.000	-14.474	229.474
22	300.000	441.670	226.670	300.000	-14.635	229.635
23	300.000	555.000	340.000	300.000	-14.796	229.796
24	300.000	895.000	680.000	300.000	-14.957	229.957
25	300.000	970.560	755.560	300.000	-14.973	229.973
26	300.000	1575.000	1360.000	300.000	-15.037	230.037
27	300.000	3615.000	3400.000	300.000	-15.085	230.085
28	300.000	7015.000	6800.000	300.000	-15.101	230.101
29	300.000	7710.560	7555.560	300.000	-15.103	230.103

Tabla 4.2: Valores de salida de la evaluación de la colinealidad entre balizas.

Los experimentos fueron ejecutados utilizando a IEEE 802.11 DCF [15] 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* y *sobrecarga*. 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, y la sobrecarga mide el número total promedio de paquetes transmitidos por nodo, incluyendo balizas. Esta última métrica cuantifica la cantidad de recursos (ancho de banda, memoria, ciclos de CPU) empleados para estimar la posición de los nodos.

Se empleó la versión 2.34 del simulador de eventos discretos NS2 [50], 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 periodo de tres segundos para actualizar su información de localización.



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

Figura 4.10: Coplanaridad entre balizas en un espacio tridimensional (3D).

En todos los experimentos, el valor de σ empleado en la implementación del método de multilateración probabilística fue configurado como $0.25 \times \text{valor estimado del promedio de longitud de un salto}$. Se empleó random waypoint como modelo de movilidad. Las velocidades de los nodos varían aleatoriamente de 1 a 20 m/s (de 3.6 a 72 km/h) con un tiempo de pausa de 10 segundos. Este rango de velocidades es empleado para cubrir desde velocidades de peatones hasta vehiculares.

En la sección 4.4.2.1 se presentan los resultados cuando los nodos son localizados en un plano 2D y las señales de radio son propagadas conforme al modelo de propagación tworayground, y en la sección 4.4.2.2 cuando los nodos son localizados en 3D y las señales de radio son propagadas conforme al modelo de propagación Durkin [18] que considera los efectos de terrenos irregulares.

4.4.2.1. Posicionamiento en dos dimensiones

En esta sección se presentan los resultados de una serie de experimentos donde se evalúa el efecto de movilidad y número de balizas (o nodos que conocen *a priori* su posición) sobre el desempeño de las versiones 2D de los diferentes protocolos cuando se propaga la señal de radio de acuerdo al modelo de propagación tworayground y cuando los nodos móviles siguen el modelo de movilidad random waypoint en un plano de $1000\text{m} \times 1000\text{m}$. En ambos casos, tanto los nodos como las balizas están configurados con un rango de transmisión de 250m. La Tabla 4.6 lista los detalles del ambiente de simulación. En las implementaciones de DV-Hop y Amorphous, que emplean el método de trilateración, los nodos seleccionan las tres balizas más cercanas en saltos que no son colineales.

Las Figuras 4.11(a-i) muestran los resultados obtenidos en tres diferentes escenarios donde se incrementa el número de nodos móviles. En el Escenario 1-2D, los nodos y balizas son estáticos; en el Escenario 2-2D, las balizas son estáticas y los nodos son móviles; en el

Nivel	Coordenadas de las balizas									Distancias						
	x_1	y_1	z_1	x_2	y_2	z_2	x_3	y_3	z_3	x_4	y_4	z_4	d_1	d_2	d_3	d_4
1	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	326.000	245.000	245.000	245.000	245.000
2	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	276.000	245.000	245.000	245.000	195.000
3	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	226.000	245.000	245.000	245.000	145.000
4	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	176.000	245.000	245.000	245.000	95.000
5	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	126.000	245.000	245.000	245.000	45.000
6	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	81.000	245.000	245.000	245.000	0.000
7	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	76.000	245.000	245.000	245.000	5.000
8	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	26.000	245.000	245.000	245.000	55.000
9	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	16.000	245.000	245.000	245.000	65.000
10	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	6.000	245.000	245.000	245.000	75.000
11	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	5.000	245.000	245.000	245.000	76.000
12	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	4.000	245.000	245.000	245.000	77.000
13	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	3.000	245.000	245.000	245.000	78.000
14	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	2.000	245.000	245.000	245.000	79.000
15	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	1.000	245.000	245.000	245.000	80.000
16	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	0.900	245.000	245.000	245.000	80.100
17	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	0.800	245.000	245.000	245.000	80.200
18	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	0.700	245.000	245.000	245.000	80.300
19	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	0.600	245.000	245.000	245.000	80.400
20	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	0.500	245.000	245.000	245.000	80.500
21	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	0.400	245.000	245.000	245.000	80.600
22	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	0.300	245.000	245.000	245.000	80.700
23	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	0.200	245.000	245.000	245.000	80.800
24	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	0.100	245.000	245.000	245.000	80.900
25	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	0.090	245.000	245.000	245.000	80.910
26	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	0.070	245.000	245.000	245.000	80.930
27	100.000	100.000	0.000	500.000	100.000	0.000	300.000	446.000	0.000	300.000	215.000	0.050	245.000	245.000	245.000	80.950

Tabla 4.3: Valores de entrada empleados en la evaluación de la coplanaridad entre balizas.

Escenario 3-2D, las balizas y los nodos son móviles. En todos los escenarios se incrementa el número de balizas de 3 a 31.

En las Figuras 4.11(a-c) se puede observar que los algoritmos presentaron una notable mejora de rendimiento mediante la simple sustitución del método tradicional de trilateración con el método de multilateración probabilística propuesto. En las figuras, las gráficas etiquetadas “DV-Hop (MP)” y “Amorphous (MP)” corresponden a las versiones DV-Hop y Amorphous que utilizan multilateración probabilística. DV-Hop (MP) reportó errores de estimación que van desde la mitad hasta un cuarto que la reportada por DV-Hop mientras que Amorphous (MP) obtuvo de manera consistente errores de estimación más pequeños que los alcanzados por Amorphous. Por último, debido a que DV-Hop (MP) y Amorphous (MP) usan exactamente los mismos algoritmos distribuidos que DV-Hop y Amorphous, estos incurren exactamente en la misma sobrecarga de control. Estos resultados confirman la hipótesis de que el método probabilístico reduce eficazmente el impacto de la *incertidumbre*, *inconsistencia* y *ambigüedad*, discutido en el Capítulo 3, que afectan negativamente el rendimiento del método de trilateración tradicional.

4.4.2.2. Posicionamiento en tres dimensiones

En esta sección se presentan los resultados de una serie de experimentos donde se evalúa el efecto de movilidad y número de balizas sobre el desempeño de las versiones 3D de los diferentes protocolos cuando se propaga la señal de radio de acuerdo al modelo de propagación Durkin [18] y cuando los nodos móviles siguen el modelo de movilidad random waypoint en un plano de 1000m × 1000m × 200m. El tipo de terreno utilizado es *ravine*, y es proporcionado por [1]. Para estos experimentos se utilizó la versión 2.31 de NS2 porque el modelo Durkin fue implementado y evaluado para esta versión. Similar a

Tabla 4.4: Valores de salida de la evaluación de la coplanaridad entre balizas.

Nivel	Trilateración				MP			
	x	y	z	δ	x	y	z	δ
1	300.000	215.000	81.000	0.000	300.000	215.000	81.000	0.000
2	300.000	215.000	81.351	0.351	300.000	215.000	81.249	0.249
3	300.000	215.000	81.429	0.429	300.000	215.000	81.195	0.195
4	300.000	215.000	81.551	0.551	300.000	215.000	81.136	0.136
5	300.000	215.000	81.769	0.769	300.000	215.000	81.069	0.069
6	300.000	215.000	82.196	1.196	300.000	215.000	81.000	0.000
7	300.000	215.000	82.275	1.275	300.000	215.000	81.005	0.005
8	300.000	215.000	84.727	3.727	300.000	215.000	-30.065	111.165
9	300.000	215.000	87.056	6.056	300.000	215.000	-50.486	131.486
10	300.000	215.000	97.150	16.150	300.000	215.000	-70.016	151.016
11	300.000	215.000	100.380	19.380	300.000	215.000	-71.901	152.901
12	300.000	215.000	105.225	24.225	300.000	215.000	-73.773	154.773
13	300.000	215.000	113.300	32.300	300.000	215.000	-75.631	156.631
14	300.000	215.000	129.449	48.449	300.000	215.000	-77.474	158.474
15	300.000	215.000	177.899	96.899	300.000	215.000	-79.303	160.303
16	300.000	215.000	188.665	107.665	300.000	215.000	-79.485	160.485
17	300.000	215.000	202.124	121.124	300.000	215.000	-79.667	160.667
18	300.000	215.000	219.427	138.427	300.000	215.000	-79.849	160.849
19	300.000	215.000	242.498	161.498	300.000	215.000	-80.030	161.030
20	300.000	215.000	274.798	193.798	300.000	215.000	-80.212	161.212
21	300.000	215.000	323.247	242.247	300.000	215.000	-80.393	161.393
22	300.000	215.000	403.996	322.996	300.000	215.000	-80.574	161.574
23	300.000	215.000	565.494	484.494	300.000	215.000	-80.755	161.755
24	300.000	215.000	1049.988	968.988	300.000	215.000	-80.936	161.936
25	300.000	215.000	1157.654	1076.654	300.000	215.000	-80.954	161.954
26	300.000	215.000	1465.269	1384.269	300.000	215.000	-80.991	161.991
27	300.000	215.000	1595.484	1514.485	300.000	215.000	-81.027	162.027

Tabla 4.5: Valores de entrada empleados en la evaluación de la coplanaridad entre balizas.

2D, las versiones 3D de DV-Hop y Amorphous, que emplean trilateración, seleccionan las cuatro balizas no coplanares más cercanas.

A menos que se indique lo contrario, los parámetros de simulación restantes son los mismos que los presentados en la Sección 4.4.2.1.

Las Figuras 4.12(a-i) muestran los resultados obtenidos en tres diferentes escenarios donde se incrementa el número de nodos móviles. En el Escenario 1-3D, los nodos y balizas son estáticos; en el Escenario 2-3D, las balizas son estáticas y los nodos son móviles; en el Escenario 3-3D, las balizas y los nodos son móviles. En todos los escenarios se incrementa el número de balizas de 3 a 31.

Las figuras 4.12(a-c) muestran que las ganancias de rendimiento alcanzadas por los algoritmos DV-Hop (MP) y Amorphous (MP) sobre las versiones básicas de DV-Hop y Amorphous son significativas. Al igual que en 2D, DV-Hop (MP) reportó errores de

Área de simulación	1000m × 1000m	Tiempo de simulación	300 segundos
Total de nodos	100	Número de balizas	{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
Velocidad de transmisión	11000000bps	Modelo de movilidad	Random waypoint
Vel. Min.-Max.	1-20m/s	Tiempo de pausa	10 segundos

Tabla 4.6: Ambiente de Simulación (2D).

estimación que van desde la mitad hasta un cuarto que las reportadas por DV-Hop mientras que Amorphous (MP) obtuvo consistentemente errores de estimación más pequeñas que las alcanzadas por Amorphous. Por último, es aparente ver que en el Escenario 3-3D los errores de localización reportados por Amorphous (MP) van desde un medio hasta un tercio de los reportados por Amorphous.

En las Figuras 4.12(d-e) también se puede observar que en los escenarios 1-3D y 2-3D, Amorphous (MP) alcanzó consistentemente más cobertura que Amorphous. Un análisis detallado reveló que en situaciones en las que los nodos en Amorphous no encontraron suficientes balizas no coplanares, los nodos en Amorphous (MP) todavía eran capaces de calcular su posición con una precisión razonablemente buena.

Por último, como se muestra en las Figuras 4.12(g-i), la sobrecarga inducida por las versiones de los algoritmos en 3D es completamente análoga a las de sus homólogos 2D.

4.5. Conclusiones

En este capítulo se introdujo el método multilateración probabilística (MP) para estimar la posición de un nodo basado en la posición de tres o más balizas y distancias estimadas de manera imprecisa hacia ellas. Esta propuesta tiene ventajas sobre el tradicional método de trilateración. (1) MP elimina el problema de *inconsistencia* debido a que puede ser utilizado, al mismo tiempo, un número arbitrario de balizas para estimar la posición de un nodo.

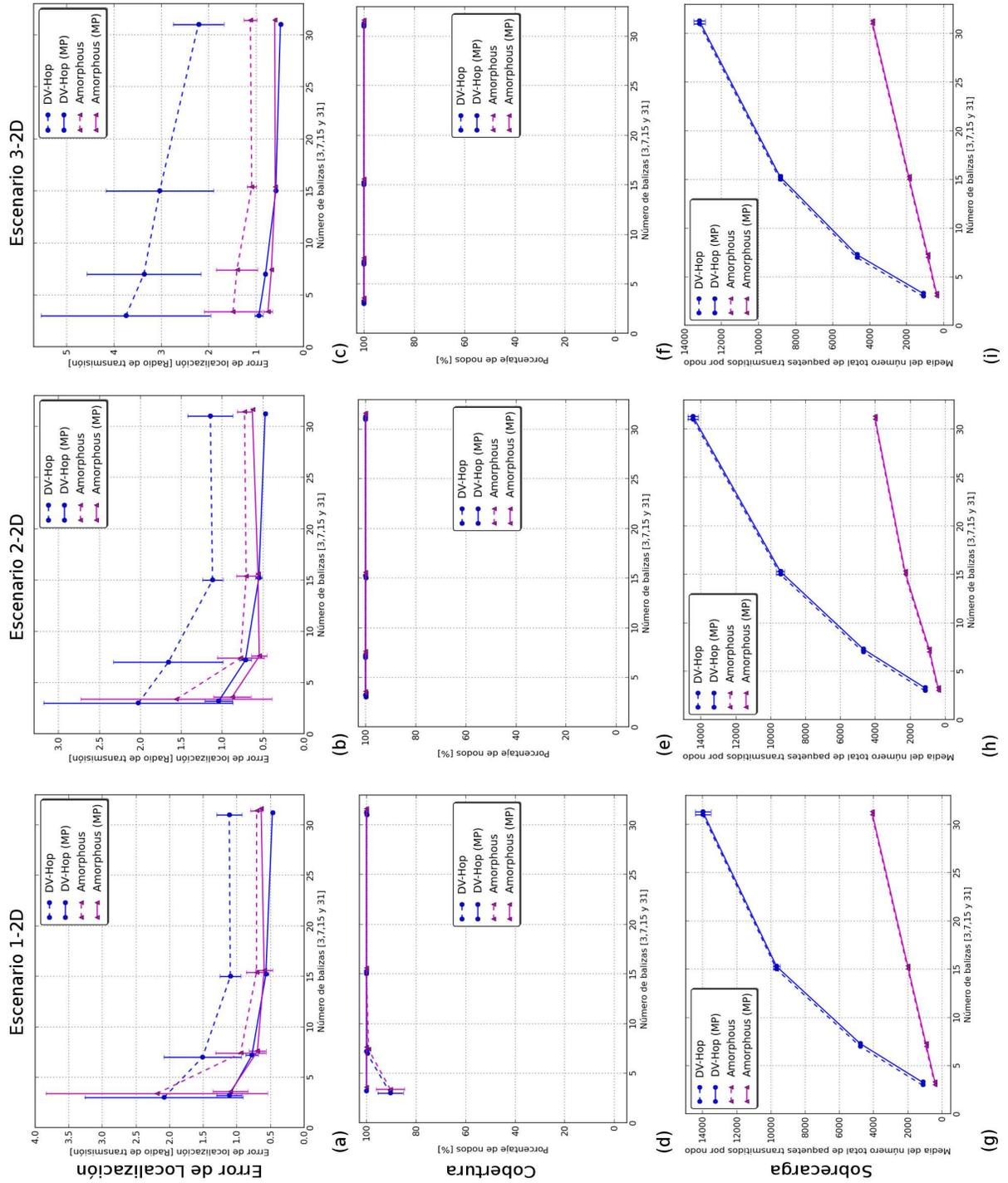


Figura 4.11: Efecto de movilidad y número de balizas cuando se utiliza un modelo de propagación 2D.

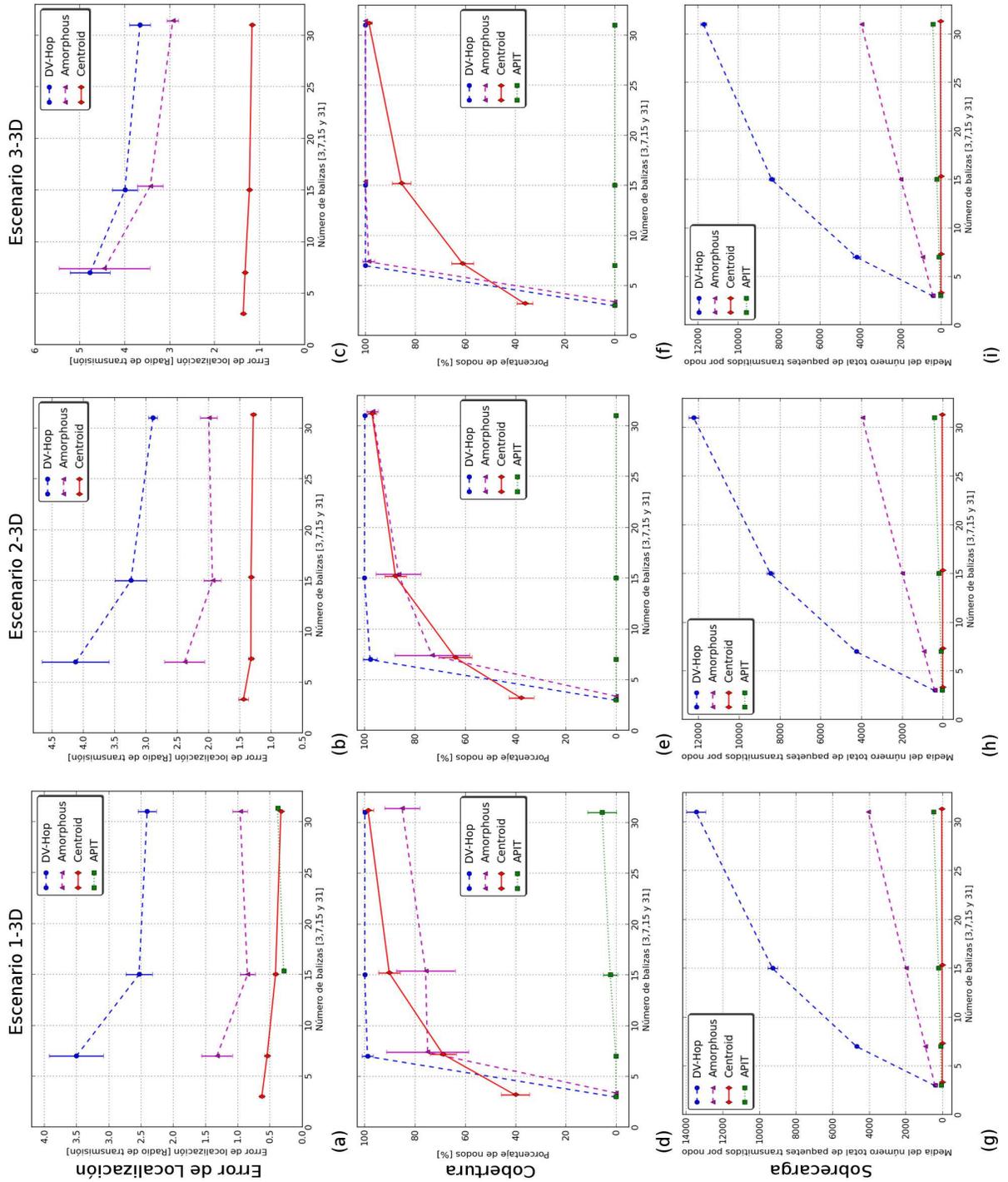


Figura 4.12: Efecto de movilidad y número de balizas cuando se utiliza un modelo de propagación 3D.

(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 balizas individuales, 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 balizas 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.

Capítulo 5

POSTAL PRIME: Protocolo de enrutamiento y posicionamiento integrado para redes móviles ad hoc

5.1. 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 MANETs, las cuales finalmente pueden brindar el soporte ideal a las aplicaciones distribuidas pensadas para espacios en movimiento. 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 su misión. 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 por separado de enrutamiento y posicionamiento que operan hasta hoy. Primero porque ellos fueron diseñados para soportar ya sea enrutamiento o posicionamiento, y por lo tanto soportar 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.

La principal contribución de este capítulo es la introducción de un marco de trabajo para enrutamiento y posicionamiento en MANETs. En este nuevo enfoque se emplea el mismo control de señalización y se elimina la distinción entre señalización bajo demanda y proactiva, y en lugar de eso se emplean regiones de interés. En enrutamiento, un nodo (enrutador) mantiene información de enrutamiento proactivamente para ese destino *multicast* para el cual tiene interés (tráfico de usuario) o para el cual otros nodos tienen interés y el nodo puede servir como un retransmisor. En posicionamiento, una o más balizas (nodos especiales que conocen a priori su posición) mantienen información de localización proactivamente para uno o más nodos demanda y para esos nodos que no tienen interés en conocer su posición pero que sirven como retransmisores de información de localización. Para lograr este esquema se establecen y mantienen regiones de interés definidas por mallas. Las mallas son componentes conexos de una MANET donde se diseña señalización de control y paquetes de datos para flujos *multicast* (en enrutamiento),

y señalización de control e información de localización (en posicionamiento).

5.2. POSTAL PRIME

5.2.1. Resumen general

POSTAL PRIME establece y mantiene estructuras de enrutamiento y posicionamiento, una estructura de enrutamiento¹ para cada grupo *multicast* activo, es decir, para cada grupo con fuentes y receptores activos, y una estructura de posicionamiento para cada baliza activa con al menos un nodo demanda². 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. 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 *multicast*. En lo que respecta a posicionamiento, una baliza activa emplea el primer *MR* enviado por un nodo demanda para establecer una malla de posicionamiento que contiene la baliza activa y al menos un nodo demanda. En un flujo *multicast*, los receptores del grupo ejecutan un algoritmo distribuido que emplea anuncios de malla (*Mesh Announcement, MA*) para elegir el núcleo del grupo, que será el receptor que continuará generando *MA*s para el grupo *multicast*. Esta elección no es necesaria para posicionamiento. Un núcleo activo o baliza activa envían anuncios de mallas (*Mesh Announcement, 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 una baliza. Cuando no se detectan fuentes activas o nodos demanda activos, el núcleo o la baliza 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 genera y disemina un aviso de vida de malla (*Live Mesh, LM*), notificación que se emplea para mantener activa una baliza y por ende para mantener activa la malla de posicionamiento que ésta genera. Para ahorrar ancho de banda, los *MA*s de flujos de datos *multicast* e información de localización son agrupados oportunísticamente. 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 baliza activa, los nodos demanda activos interesados en ella y los nodos retransmisores necesarios que los conectan. Los receptores, las balizas y los retransmisores (en enrutamiento y posicionamiento) permanecen activos durante el tiempo que hay fuentes activas o nodos demanda activos en el componente conexo. Cada

¹Enrutamiento *multicast* para la primer versión POSTAL PRIME que se presenta en este trabajo de tesis doctoral.

²Un nodo con interés en conocer su posición.

núcleo envía *MAs* con un número de secuencia mayor cada período *MA*, a menos que dejen de recibir paquetes de datos dos períodos *MA* consecutivos. Las balizas envían *MAs* con un número de secuencia mayor cada período *MA*, a menos que ellos dejen de recibir *MLs* durante tres períodos *ML* consecutivos. 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 *MAs* o paquetes de datos. En posicionamiento, las estructuras son eliminadas en caso de no recibir *MAs* en cuatro períodos *MA* consecutivos o no recibir *MLs* en cuatro períodos *ML* consecutivos. Es importante destacar que POSTAL PRIME integra de manera oportunista enrutamiento en posicionamiento, es decir, mientras las balizas diseminan información de localización, todos los nodos que forman la estructura de posicionamiento mantienen rutas hacia las balizas. También integra enrutamiento y posicionamiento en la misma señalización. Asimismo, 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 sea más eficiente.

5.2.2. Activación y desactivación de mallas

POSTAL PRIME mantiene información de enrutamiento y de posicionamiento únicamente para aquellos destinos por los cuales existe un interés o nodos demanda con interés en información de localización. Por consiguiente, activa y desactiva estructuras (mallas) empleadas para soportar enrutamiento y posicionamiento. Las mallas se activan usando solicitudes de activación de mallas (*Mesh-activation Requests, MR*) que permiten que los destinos o balizas cambien sus estados de inactivos a activos e inicien el proceso de creación y mantenimiento de las mallas. Una solicitud de activación de malla (MR_D^S) generada por la fuente o el nodo demanda S , para el destino o la baliza D y transmitida por el nodo B , se compone de una tupla de siete elementos de la forma:

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

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 baliza, sn^S es el identificador para el mensaje. El primer *MR* enviando por una fuente, en enrutamiento, lleva adjunto un paquete de datos.

A la llegada de un *MR*, un nodo o una baliza verifica en su caché de datos el identificador de la fuente o del nodo demanda y el identificador del mensaje. Si existe esta información en la caché y el valor del horizonte de *MR* ha sido alcanzado, el mensaje se desecha. Si el nodo es el destino (se considera núcleo del grupo *multicast*) o la baliza de ese mensaje *MR*, entonces éstos almacenan el *MR* y después cambian su estado de inactivo a activo e inician el proceso de envío de mensajes *MA* para anunciar su presencia mediante el

establecimiento de una malla.

Los nodos también almacenan la distancia en saltos que hay entre él y cada emisor de un MR , ya sea una fuente o un nodo demanda. Estas distancias son obtenidas del campo d_S^B incluido en cada MR . En general, esta información es utilizada para incluir nuevos nodos demanda o fuentes en la región de interés.

La activación y desactivación de mallas en enrutamiento *multicast* incluye además la elección de un núcleo para cada destino. Los nodos destino participan en una elección distribuida que informa a todos los nodos en el mismo componente conexo de la red acerca del destino activo, el identificador del núcleo y uno o más nodos que son siguiente salto hacia el núcleo.

Un nodo receptor de un grupo *multicast* se considera “receptor inactivo” hasta que recibe un MR , un MA o un paquete de datos dirigido hacia el destino para el cual es receptor. Cuando un nodo receptor inactivo recibe un MA proveniente de su grupo *multicast* o región, este receptor no participa en el proceso de selección del núcleo, ya sea porque que el núcleo para ese destino ya fue seleccionado o porque el proceso de selección ya ha iniciado. Cuando esto ocurre, el receptor del grupo *multicast* se concreta a aceptar el núcleo publicado en el MA y posteriormente cambia su estado de “receptor inactivo” a “receptor activo”. Si un receptor inactivo recibe un paquete de datos para su grupo *multicast* o región, entonces asume que no ha recibido un MR y que el grupo posiblemente ya ha sido activado. Por lo tanto, retrasa su participación en el proceso de elección del núcleo y envía un MA al grupo *multicast* donde no se propone un núcleo. Esto lo interpretan los nodos vecinos que lo reciben como actualización de información del grupo o región al que pertenecen. El receptor espera un período razonable de tiempo (por ejemplo, un segundo) para recolectar MAs de sus vecinos. Si recibe MAs actuales para su grupo *multicast*, entonces adopta como núcleo el publicado en esos MAs recibidos. Si durante ese período de tiempo no recibe MAs , entonces el nodo se considera el núcleo de su grupo *multicast* o región y por consiguiente participa en la elección distribuida del núcleo usando MAs . Por último, si un receptor activo recibe un MA , éste mantiene su estado activo.

5.2.3. Establecimiento y mantenimiento de mallas

Las mallas en POSTAL PRIME son mantenidas a través de anuncios de mallas (MAs). Un (MA_D^{*B}) generado y enviado por un destino o una baliza D , y transmitido por un nodo B , se compone de una tupla de ocho elementos de la forma:

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

donde id^{*B} es el identificador de B . $core_D^{*B}$ es el identificador del destino o la baliza conocida por B . sn_D^{*B} es el número secuencial más reciente conocido por B con respecto al destino o baliza D . d_D^{*B} es la distancia de B hacia el destino o hacia la baliza. 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 MAs 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 B en dirección hacia el destino o hacia la baliza D . En posicionamiento, $core_x$ y $core_y$ corresponde a la posición x y y de la baliza.

Para cada destino o baliza D , un nodo mantiene una lista de vecindario L_D que almacena un conjunto ordenado que está compuesto de MAs que el nodo ha recibido recientemente por parte de sus vecinos respecto a un destino o una baliza. Para diferenciar un MA que acaba de ser recibido, un MA recibido por parte de un vecino B y que ya está almacenado en la lista L_D se denota por MA_D^{*B} (con el *bajo).

Cada MA almacenado en L_D se registra con una estampa de tiempo (ts) obtenida del reloj local. Los anuncios son ordenados usando una relación de orden estricto total \prec , que se define como sigue:

$$MA_D^B \prec MA_D^A \Leftrightarrow (sn_D^B < sn_D^A) \vee (sn_D^B = sn_D^A \wedge d_D^B > d_D^A) \vee (sn_D^B = sn_D^A \wedge d_D^B = d_D^A \wedge id^B < id^A) \quad (5.1)$$

Además de una L_D , un nodo x mantiene un registro del identificador del destino o de la baliza ($core_D^x$), del número de secuencia más reciente conocida hacia el destino o baliza (sn_D^x), de su distancia actual hacia el destino o baliza (d_D^x), de su distancia factible hacia destino o baliza (fd_D^x) y de su siguiente salto preferencial en dirección hacia el destino o hacia la baliza ($next_D^x$). El valor inicial del estado de enrutamiento y posicionamiento es el siguiente: $L_D \leftarrow \emptyset$, $core_D^x \leftarrow next_D^x \leftarrow nil$, $sn_D^x \leftarrow 0$, $d_D^x \leftarrow \infty$, $fd_D^x \leftarrow \infty$ y $mm_D^x \leftarrow REG$ (nodo regular).

5.2.4. Procesamiento de anuncios de malla

Después de la recepción de un MA_D^{*B} proveniente de un nodo vecino B con respecto a un destino o baliza D , un nodo x actualiza su información de enrutamiento o posicionamiento empleando las siguientes fórmulas.

El nodo x acepta un MA si éste último contine un número secuencial igual o mayor que el número secuencial más grande almacenado en el nodo x o si es la primera vez que el nodo x recibe un MA del nodo B (Ecuación 5.2). En caso contrario, el MA es eliminado (Ecuación 5.2).

$$L_D \leftarrow \begin{cases} L_D \cup \{MA_D^{*B}\} & \text{si } MA_D^B \notin L_D \\ L_D - \{MA_D^B\} \cup \{MA_D^{*B}\} & \text{si } sn_D^x \leq sn_D^{*B} \\ L_D & \text{en cualquier otro caso } sn_D^x > sn_D^{*B} \end{cases} \quad (5.2)$$

La distancia factible (fd_D^x) de un nodo x hacia un destino o hacia una baliza es una función no creciente con el tiempo que sólo se restablece por un nuevo número de secuencia (Ecuación 5.3). Las distancias factibles son empleadas para seleccionar un conjunto de siguientes saltos hacia un destino o hacia una baliza.

$$fd_D^x \leftarrow \begin{cases} fd_D^{*B} & \text{si } sn_D^{*B} > sn_D^x \\ \min\{fd_D^x, d_D^{*B}\} & \text{si } sn_D^{*B} = sn_D^x \\ fd_D^x & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (5.3)$$

El número secuencial almacenado en el nodo x con respecto a una baliza o destino D es una función estrictamente creciente con el tiempo. POSTAL PRIME utiliza números secuenciales que consisten en una marca de tiempo tomada del reloj de tiempo real del nodo, y un contador entero sin signo monotónicamente creciente. Cuando el contador alcanza su valor máximo, los nodos emplean una estampa nueva y restablecen el contador a cero.

$$sn_D^x \leftarrow \max\{sn_D^x, sn_D^{*B}\}$$

La distancia (d_D^x) del nodo x hacia un destino o una baliza D se calcula usando la Ecuación 5.4 y la relación \prec definida en la Ecuación 5.1. Por definición, un destino o baliza tiene como distancia a sí misma el valor de 0, y su distancia factible siempre es 0. Se supone cada costo de enlace (lc) es un valor real positivo.

$$d_D^x \leftarrow \begin{cases} d_D^i + lc_i^x : \max_{i \in L_D: sn_D^i = sn_D^x} \{i\} & \text{si tal } i \text{ existe} \\ \infty & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (5.4)$$

El siguiente salto $next_D^x$ hacia un destino o baliza D también es calculado usando la relación \prec definida en la Ecuación 5.1, los valores actuales de las distancias factibles, y el número secuencial.

$$next_D^x \leftarrow \begin{cases} d_D^i : \max_{i \in F_D^x} & \text{si tal } i \text{ existe} \\ nil & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (5.5)$$

donde $F_D^x = \{i : i \in L_D \wedge fd_D^x = d_D^i \wedge sn_D^i = sn_D^x\}$ es el conjunto de vecinos factibles de x hacia un destino o hacia una baliza D .

Si un nodo x recibe un MA anunciando un destino o una a baliza con un identificador mayor ($core_D^{*B} > core_D^x$) entonces L_D se ajusta a MA_D^{*B} , $core_D^x$ a $core_D^{*B}$ y los otros parámetros son ajustados como sigue: fd_D^x a d_D^{*B} , d_D^x a $d_D^{*B} + lc_B^x$, sn_D^x a sn_D^{*B} , y $next_D^x$ a id^B . En caso contrario, si $core_D^{*B} < core_D^x$, entonces el MA simplemente se descarta.

Por último, la bandera de membresía $mm_D^x \in \{RM, MM, RCV, REG\}$ indica si x es un nodo regular (REG), un receptor del grupo (RCV), un miembro de la malla (MM), o ambos, es decir, un receptor del grupo *multicast* y un miembro de la malla (RM). Un nodo x es miembro de la malla si y sólo si:

$$\exists y \in L_D : mm_D^y \neq REG \wedge mm_D^y \neq NIL \wedge d_D^y > d_D^x \wedge next_D^y \leq id^x \wedge ts_D^y \geq ct + MA_period \quad (5.6)$$

5.2.5. Transmisión de anuncios de malla

Los nodos transmiten *MA*s para informar a otros nodos acerca de actualizaciones en su estado de enrutamiento y posicionamiento con respecto a un destino o baliza. Las actualizaciones generalmente son originadas por eventos internos, por ejemplo, la generación de un nuevo número de secuencia por parte de un destino o una baliza; o por eventos externos como la recepción de un *MR* generado por una fuente o un nodo demanda que se acaba de activar o por la recepción de un MA_D^B proveniente de un nodo *B*.

Para reducir el número de control de paquetes transmitidos y ahorrar ancho de banda, los nodos agrupan oportunísticamente *MA*s en paquetes de control para diferentes destinos, lo mismo se hace con aquellos *MA*s dirigidos a diferentes nodos demanda activos. Cuando se detecta un evento, específicamente de enrutamiento, los nodos esperan un período de tiempo corto (por ejemplo, 50ms) antes de transmitir el *MA* que informa a otros nodos acerca del cambio en el estado del nodo. Cualquier otro evento que ocurra durante este período de tiempo será reportado en el siguiente grupo de *MA*s que será transmitido. Por lo tanto, cuando el grupo de *MA*s es transmitido puede incluir anuncios para distintos destinos *multicast* y nodos demanda activos (en caso de posicionamiento) con actualizaciones recientes de sus correspondientes estados de enrutamiento y posicionamiento respectivamente.

5.2.6. Regiones de interés

Una región de interés de un destino o una baliza *D* es un componente conexo de la red que contiene los nodos que son relevantes para la diseminación de información ya sea para los flujos con destino *multicast* o para los nodos demanda *D*, es decir el destino, las fuentes y los nodos retransmisores que conectan a las fuentes con el destino, en enrutamiento, y en posicionamiento, la baliza, los nodos demanda y los nodos retransmisores localizados en los caminos que conectan a los nodos demanda con la baliza. Ahora bien, debido a que todos los nodos en la región de interés del destino *multicast* o de la baliza tienen el mismo interés en el destino o en la baliza, ellos participan proactivamente en la señalización necesaria para mantener información de enrutamiento para el destino *multicast* o de localización de la baliza. Por tal razón, los nodos que están localizados fuera de la región de interés definida para el destino *multicast* o para la baliza no participan en el proceso de diseminación de paquetes hacia el destino en enrutamiento, y de información de localización de la baliza en posicionamiento, por lo tanto, la transmisión y recepción de *MA*s con respecto a ese destino *multicast* o esa baliza es una sobrecarga innecesaria para ellos.

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*. Asimismo, en posicionamiento, las regiones de interés son establecidas con el soporte de mensajes *ML* que fluyen desde los nodos demanda hacia las balizas. El Algoritmo 10 es empleado para decidir si un nodo tiene que retransmitir un *MA* hacia un destino *multicast* *D*. El Algoritmo 11 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 verdadero si es igual a 0, con cualquier otro valor regresa falso. 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 baliza, 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 *ML* procedente de cualquier nodo demanda hacia una baliza *D* durante *MA* períodos (en segundos), y *false* en caso contrario.

```

1 if AddressType(M.A.D) == multicast then
2   if rc ∨ sd ∨ mm ∨ pn then
3     if  $r \bmod R = 0$  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 10: Transmisión de MAs en la región de interés de enrutamiento.

```

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

```

Algoritmo 11: Transmisión de MAs en la región de interés de posicionamiento.

También se define la región de interés *k-extendida*. En enrutamiento se define como la unión de la región de interés de un flujo con los nodos que están localizados a *k* saltos fuera de la región de interés. En posicionamiento se define como la unión de la región de interés de posicionamiento con los nodos que están localizados a *k* saltos fuera de la región. El objetivo de la región de interés *k-extendida* es proveer un grado de redundancia para hacer frente a la movilidad de los nodos. Los nodos localizados dentro de la región de interés *k-extendida* reenvían *MA*s recientes con la misma frecuencia que los nodos que se encuentran localizados dentro de la región de interés.

La Figura 5.1 presenta un ejemplo de una región de interés de un flujo *multicast* y de una baliza así como también su asociada región de interés 1-extendida. 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 núcleo d . Los nodos w y x son parte de la región de interés 1-extendida y podrían ayudar a mantener la región conectada si R_1 se mueve y queda fuera de rango de la malla MM_1 . En posicionamiento, los nodos etiquetados r , r' y r'' forman parte de la región de interés porque se encuentran a una menor o igual distancia en saltos que n hacia la baliza b . Los nodos x y t son parte de la región de interés 1-extendida que ayudan a mantener la región conectada en caso de que el nodo n se mueva y quede fuera de rango de la baliza y de r (en el ejemplo de la Figura 5.1).

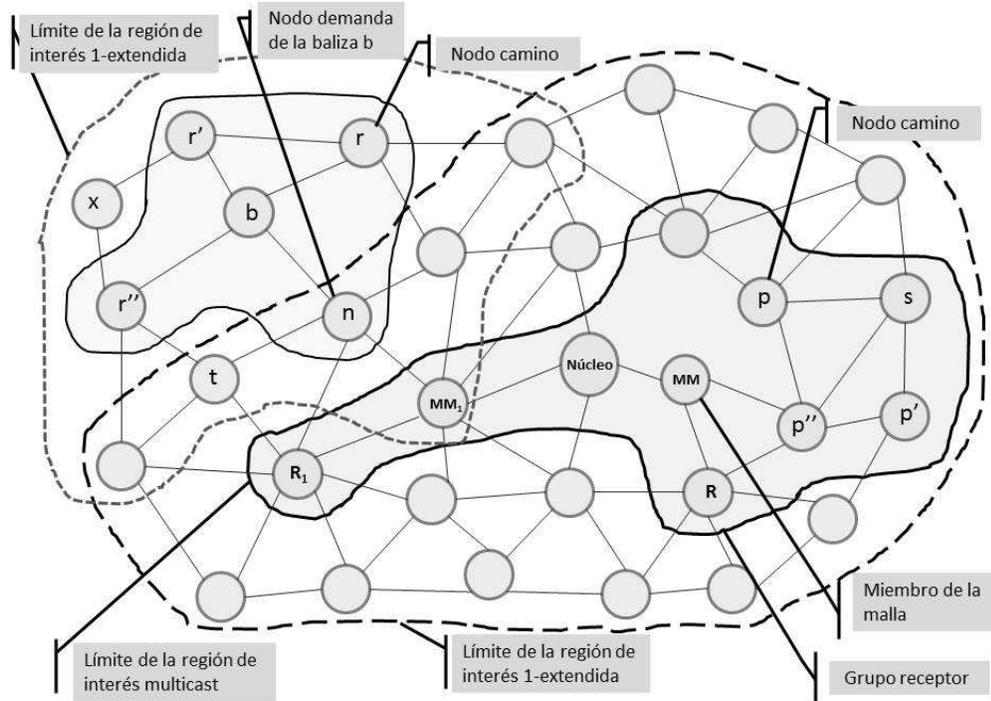


Figura 5.1: Ejemplos de regiones de interés de un flujo *multicast* y de una baliza. Asimismo, sus respectivas regiones de interés 1-extendida.

En enrutamiento, una fuente S que se convierte activa y que está localizada fuera de la región de interés de un destino D puede tomar ventaja del estado establecido por la diseminación de MAs para adquirir rutas hacia D . Sin embargo, si la fuente está ubicada lejos de la región de interés de D , el estado mantenido para S en relación a D podría ser obsoleto. En el último caso, S tiene que transmitir una solicitud de activación de malla (MR_D^S). Cuando un MR_D^S alcanza un nodo x que es parte de la región, x tiene que replicar con un MA . El estado establecido por el MR_D^S (ver la Sección 5.2.2) es usado entonces para encaminar el MA generado por x hacia la fuente S . De esta manera, la nueva fuente adquiere rutas hacia D y se incluye en la región de interés. El estado utilizado para encaminar MAs hacia la fuente es de corta duración y se elimina dentro

de un período MA . Del mismo modo, los nodos localizados ya sea dentro de la región de interés o no muy lejos de ella pueden unirse a D simplemente transmitiendo un MA . Por otra parte, un nodo q que está localizado lejos de la región de interés, que desee unirse a D , y cuyo estado con respecto a D es obsoleto, tienen que transmitir un MA_D^r con $core_D^r \neq r$ y d_D^r igual a la última distancia conocida hacia el destino D . Este MA es diseminado $d_D^r + 1$ saltos de q estableciendo un estado similar al establecido por la difusión de un MR . Tras la recepción de un MA_D^r , los nodos que forman parte de la región replican con MA s que son encaminados hacia q , de modo que q sea incluida en la región de interés.

En relación a posicionamiento, un nodo demanda S que se convierte activa y que está localizado fuera de la región de interés de una baliza D puede tomar ventaja del estado establecido por la diseminación de MA s para obtener información de localización y adquirir oportunísticamente rutas hacia D . Sin embargo, si el nodo demanda está ubicado lejos de la región de interés de D , el estado mantenido para S en relación a D podría ser obsoleto. En el último caso, S tiene que transmitir una solicitud de activación de malla (MR_D^S). Cuando un MR_D^S alcanza un nodo x que es parte de la región, x tiene que replicar con un MA . El estado establecido por el MR_D^S (ver la Sección 5.2.2) es usado entonces para encaminar el MA generado por x hacia el nodo demanda S . De esta manera, el nuevo nodo demanda adquiere rutas hacia D y se incluye en la región de interés. El estado utilizado para encaminar MA s hacia la fuente es de corta duración y se elimina dentro de un período MA . Del mismo modo, los nodos localizados ya sea dentro de la región de interés o no muy lejos de ella pueden unirse a D simplemente transmitiendo un MA . Por otra parte, un nodo q que está localizado lejos de la región de interés, que desee unirse a D , y cuyo estado con respecto a D es obsoleto, tienen que transmitir un MA_D^r con $core_D^r \neq r$ y d_D^r igual a la última distancia conocida hacia el destino D . Este MA es diseminado $d_D^r + 1$ saltos de q estableciendo un estado similar al establecido por la difusión de un MR . Tras la recepción de un MA_D^r , los nodos que forman parte de la región replican con MA s que son encaminados hacia q , de modo que q sea incluida en la región de interés.

5.2.7. Retransmisión de paquetes y reparaciones locales

Cuando una fuente tiene datos que retransmitir, verifica si ha recibido ya un MA de ese destino *multicast* en los últimos tres períodos MA . Si no, retransmite un MR tal como se describe en la Sección 5.2.2. En caso contrario, las fuentes reenvían los paquetes de datos de acuerdo a su tabla de enrutamiento.

Tras recibir un paquete de datos, los nodos verifican en su memoria caché de paquetes de datos, la cual almacena la dirección de la fuente y el número de secuencia de los paquetes de datos recibidos recientemente, si existe tal información en caché. En caso de que así sea, el paquete recibido simplemente se elimina. En caso contrario, el nodo receptor inserta el par de información en su caché de paquetes y determina si tiene o no que retransmitir el paquete de datos. Si el nodo es el destino final del flujo, entonces pasa el paquete de datos a capas superiores. En enrutamiento *unicast*, los nodos envían paquetes de datos siempre y cuando forman parte del camino más corto entre la fuente y

el destino.

Los retransmisores localizados en las mallas de enrutamiento emplean la transmisión de paquetes de datos a sus siguientes saltos como reconocimientos implícitos (*implicit acknowledgments, ACK*). Si un nodo falla al recibir de manera consecutiva tres reconocimientos implícitos provenientes de un vecino, entonces remueve ese nodo de la lista de vecinos L_D . Asimismo actualiza el valor de $next_D^x$ usando la Ecuación 5.5 y el valor de d_D^x usando la Ecuación 5.4.

Como se discutió previamente en la Sección 5.2.5, un cambio en cualquiera de esos dos valores fuerza al nodo x a transmitir un nuevo MA para anunciar su nuevo estado y, por ejemplo, forzar al reciente nodo seleccionado como siguiente salto a encaminar paquetes de datos hacia el destino. Si el valor de $next_D^x$ es igual a nil después de remover el vecino de L_D , entonces la distancia factible actual fd_D^x es incluida en el MA (en lugar del nuevo valor de la distancia d_D^x). Un MA con $next_D^x = nil$ e $id^{*x} \neq core_D^x$ es interpretado como una solicitud de vecino (*neighbor request*) que informa a otros nodos que x ya no tiene ruta hacia el destino. Tras la recepción de una solicitud de vecino proveniente x , los nodos eliminan de L_D la entrada de x , y por consiguiente actualizan su estado de enrutamiento. Adicionalmente, un nodo z también transmite un MA como una respuesta a la solicitud de vecino si se cumple con el siguiente predicado:

$$next_D^x = nil \wedge (sn_D^z > sn_D^{*x} \vee sn_D^z = sn_D^{*x} \wedge d_D^z \leq d_D^{*x}) \quad (5.7)$$

Esto es porque z es un salto siguiente factible para x y se puede utilizar para llegar al destino a través de un camino libre de ciclos.

5.2.8. Elección de núcleos (Enrutamiento *multicast*)

La elección del núcleo en enrutamiento multicast se determina como se describe a continuación. Cuando un nodo miembro del grupo *multicast* recibe un MR y no ha recibido un MA del núcleo del destino en los últimos periodos MA , se considera a así mismo como núcleo, y da comienzo a la transmisión de MA s referentes al destino del MR . Los nodos actualizan su información y propagan los MA s en base al mejor anuncio que reciben de sus vecinos. En *multicast*, un MA de un núcleo cuyo identificador es mayor, es mejor que un MA de un núcleo con identificador menor. Si un nodo recibe un MA de un núcleo con identificador mayor al núcleo actual, entonces adopta el nuevo núcleo, y transmite un MA que publica el cambio. Por otro lado, si recibe un MA con identificador menor al actual, verifica si recientemente ha transmitido un MA que publique al núcleo actual, y si lo ha enviado, entonces simplemente ignora el MA . Si no lo ha enviado, entonces envía un MA con el núcleo actual, lo cual fuerza al vecino con identificador de núcleo menor a adoptar al núcleo de indentificador mayor. Con lo anterior se consigue que finalmente que cada componente conexo tenga sólo un núcleo.

5.2.9. 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 balizas dentro de un horizonte predefinido. El proceso de estimación de posición es iniciado por el nodo demanda, como se ha especificado al inicio de este capítulo. Sin embargo, no es hasta que se inicia el proceso de disseminación de información, por parte de las balizas, cuando se calculan salto a salto las distancias euclidianas. 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 distancia euclidiana empleando la fórmula utilizada en [37] para determinar la longitud de un salto. Cuando un nodo demanda recibe información de localización de al menos tres balizas emplea el método *multilateración probabilística*, propuesto en este trabajo de tesis doctoral y descrito en el capítulo previo, para estimar su posición.

5.3. Validación experimental

En esta sección se presentan los resultados comparativos de simulación de las primera versión distribuida del protocolo POSTAL PRIME y ODMRP con Amorphous para el caso de enrutamiento *multicast* y posicionamiento respectivamente. Los experimentos fueron ejecutados utilizando a IEEE 802.11 DCF [15] 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*, *porcentajes 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 balizas. 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 5.8. 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 paquetes. El retardo extremo a extremo se obtiene mediante la Ecuación 5.9.

$$\sum_{i=1}^{n_s} \frac{n_r(i)}{n_m(i)} \quad (5.8)$$

Área de simulación	1000m × 1000m y 1400m × 1400m	Tiempo de simulación	150 segundos
Total de nodos	100	Número de balizas	{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

Tabla 5.1: Ambiente de simulación

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.

$$\frac{1}{n_r} \sum_{i=1}^{n_r} t_r(i) - t_s(i) \quad (5.9)$$

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 [50], 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 de tesis, 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 5.1 resume de manera general los parámetros empleados en los experimentos.

5.3.1. Desempeño de los protocolos

Las Figuras 5.2(a), 5.2(b) y 5.2(c) muestran el error de localización alcanzado por los protocolos a medida que se aumenta el número de balizas. El protocolo POSTAL PRIME superó constantemente el desempeño de ODMRP con Amorphous por incurrir en errores de localización, en general, cerca de la mitad de la magnitud reportada por éstos últimos.

En las Figuras 5.2(a), 5.2(b) y 5.2(c) también se puede observar, que a medida que se aumenta el número de balizas, el error de localización reportado por POSTAL PRIME y ODMRP con Amorphous decremента. 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 balizas. Como el número de balizas incrementa, la probabilidad de encontrar balizas cercanas también incrementa y por lo tanto el error de estimación disminuye. Por otro lado, a medida que se aumenta el número de nodos móviles, el error de estimación los protocolos también aumenta. Esto es debido a que los protocolos dependen en mayor medida de la información topológica porque 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 5.2(j), 5.2(k) y 5.2(l). Asimismo, en las Figuras 5.2(a), 5.2(b) y 5.2(c) se puede observar que POSTAL PRIME mejora de rendimiento de manera considerable debido a que emplea el método de multilateración probabilística propuesto en esta tesis para estimar posición, mientras que Amorphous emplea el método tradicional de trilateración. Estos resultados confirman la hipótesis de que el método probabilístico reduce eficazmente el impacto de la *incertidumbre*, *inconsistencia* y *ambigüedad*, discutido en el Capítulo 4, que afectan negativamente el rendimiento del método de trilateración tradicional.

En este trabajo se reportan resultados de tres experimentos. Escenario 1 (1 fuente activa), Escenario 2 (3 fuentes activas) y Escenario 3 (7 fuentes activas). Los tres escenarios emplearon un sólo grupo *multicast* de 20 nodos, es decir, 1, 3 y 7 fuentes activas que envía datos hacia un único grupo *multicast*. En las Figuras 5.2(d), 5.2(e) y 5.2(f) se observa que el número de paquetes entregados por POSTAL PRIME, en promedio, es igual o mayor al de ODMRP con Amorphous. Asimismo, conforme fue incrementado el número de fuentes activas, en ambos casos, el número de paquetes entregados disminuyó debido a la congestión de colas y colisiones.

Por otro lado, en las Figuras 5.2(m), 5.2(n) y 5.2(o) se observa que el retardo extremo a extremo en POSTAL PRIME es al menos igual al reportado por ODMRP con 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 tuvo mejor desempeño que ODMRP con Amorphous en los Escenarios 2 y 3. 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 a las generadas sobre un área de simulación de $1400\text{m} \times 1400\text{m}$.

Finalmente, las Figuras 5.2(g), 5.2(h) y 5.2(i) muestran la sobrecarga inducida por los diferentes protocolos. Como era de esperarse, la sobrecarga aumentó a medida que el número de balizas incrementó debido a que las balizas diseminan información de localización periódicamente. Asimismo se puede observar que la sobrecarga aumentó conforme aumentó el número de fuentes activas.

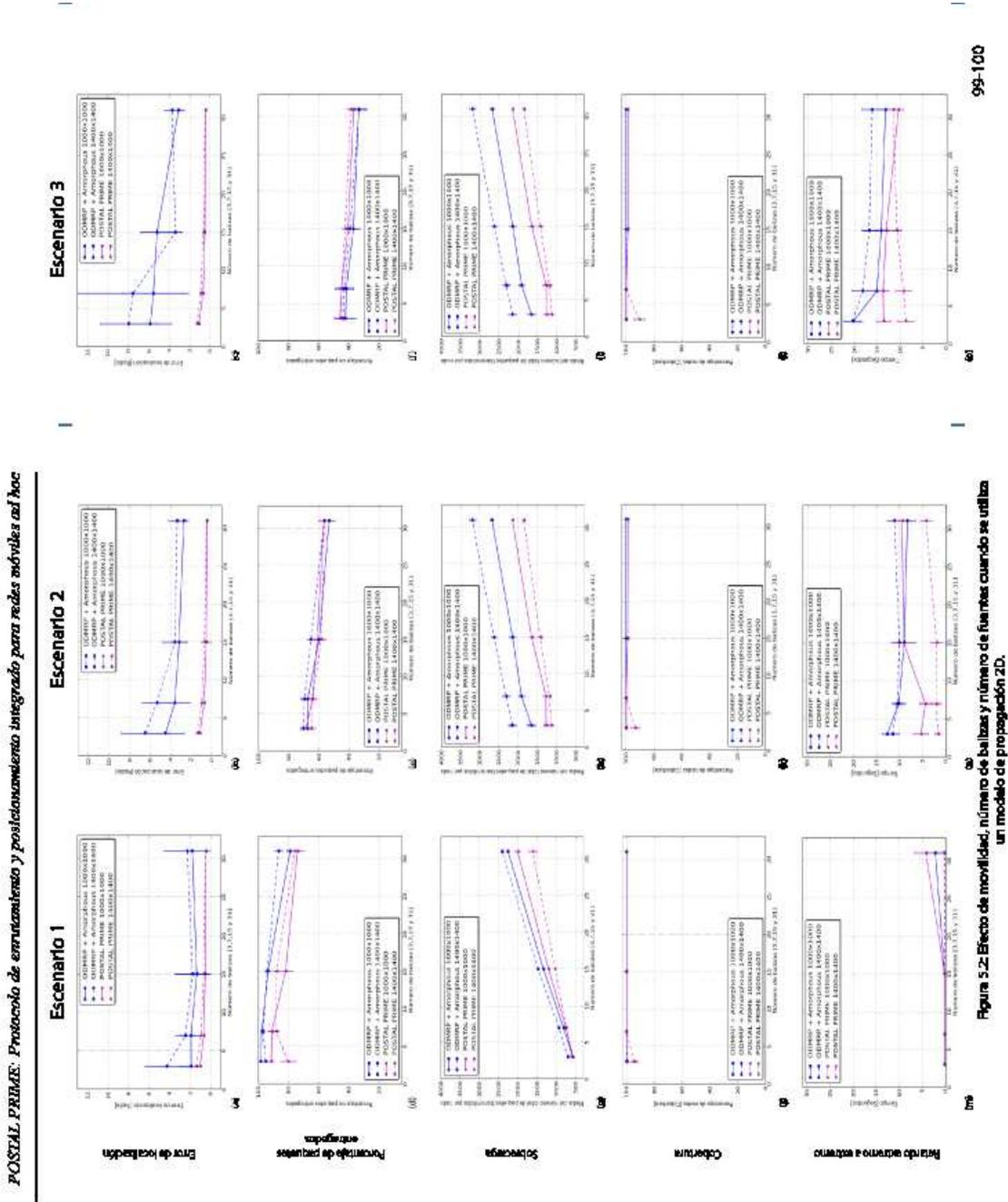


Figura 5.2: Efecto de movilidad, número de balizas y número de fuentes cuando se utiliza un modelo de propagación 2D.

Figura 5.2: Efecto de movilidad y número de balizas cuando se utiliza un modelo de propagación 3D.

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. Esto último provoca errores al momento de calcular las distancias en saltos hacia las balizas, 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 balizas.

5.4. Conclusiones

Mediante el trabajo presentado en este capítulo se demuestra que es posible pero más aún deseable brindar soporte de difusión de información de enrutamiento y posicionamiento a las aplicaciones de los usuarios finales a través de un único protocolo, y que la propuesta de integrar ambos servicios en un protocolo basado en regiones de interés impulsa un enfoque más atractivo para MANETs que las propuestas actuales que proporcionan dichos servicios bajo demanda o de manera proactiva a través de protocolos completamente independientes. En este capítulo se introdujo POSTAL PRIME, un protocolo que redefine la forma en la que se integra enrutamiento y posicionamiento en una misma señalización mediante el uso de mallas y regiones de interés. POSTAL PRIME establece mallas (componentes conexos de una MANET) que se activan y se desactivan por la presencia o ausencia de tráfico de datos y de nodos con interés de conocer su posición. 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, sobre todo en redes de gran escala donde las balizas y los nodos interesados en su posición tienden a estar cerca unos de otros. 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 con Amorphous. Asimismo, POSTAL PRIME induce menos sobrecarga de control de comunicación y alcanza retornos menores, generalmente, que su contraparte. Por otra lado, POSTAL PRIME es hasta la fecha el único protocolo que combina dos servicios diferentes en un sólo protocolo, pero que además proporciona un desempeño adecuado en redes de gran escala con tráfico de enrutamiento y localización combinado.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo futuro

6.1. Conclusiones

En este trabajo de tesis doctoral se presentó POSTAL PRIME, el primer protocolo de enrutamiento y posicionamiento integrado para MANETs, el cual enruta flujos de datos *multicast* y realiza estimación de posición. POSTAL PRIME se basa en un nuevo paradigma de enrutamiento denominando *basado en interés*. En esta nueva forma de realizar enrutamiento y posicionamiento, se forman regiones de interés que son mallas formadas por aquellos nodos que manifiestan tener interés en transmitir datos para algún destino o interés en estimar su posición, por nodos receptores de destinos (en el caso de enrutamiento), por balizas (en el caso de posicionamiento) y por nodos intermedios (para ambos casos). Las balizas y los destinos son quienes forman las mallas mediante anuncios, y en esta región generada es donde se da mantenimiento proactivo por medio de intercambio periódico de control e información de localización a las rutas para un determinado destino o baliza. Los caminos existentes entre las fuentes y destinos o entre los nodos con interés de posición y balizas, están formados por las rutas más cortas. Las mallas se desactivan cuando dejan de existir flujos de datos para un destino o cuando se deja de tener interés en conocer la posición y de recibir información de localización de las balizas, para los cuales se formaron las regiones. Esto evita que la red sea inundada con información de control en casos en el que no existan flujos de datos o nadie está interesado en conocer su posición. Las regiones de interés 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.

Por otro lado, esta tesis doctoral también presentó un nuevo método de estimación de posición denominado *Multilateración Probabilística* (MP). Este método se emplea para estimar la posición de un nodo basado en la posición de tres o más balizas y distancias estimadas de manera imprecisa hacia ellas. MP tiene cuatro ventajas principales sobre trilateración, el método tradicional empleado para estimar posición. (1) MP elimina el problema de *inconsistencia* debido a que puede ser utilizado, al mismo tiempo, un número arbitrario de balizas 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 balizas individuales, 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 balizas 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.

6.2. Contribuciones originales

Se desarrolló el método de multilateración probabilística que reduce eficazmente el impacto de la incertidumbre, inconsistencia, ambigüedad, colinealidad (coplanaridad) que afectan el rendimiento del método de trilateración tradicional.

Se desarrolló el primer marco de trabajo para MANETs que integra posicionamiento y enrutamiento en un único protocolo.

- **Primer** protocolo que emplea la misma señalización de control para soportar tanto tráfico *multicast* como información de localización.
- **Primer** protocolo de posicionamiento que elimina la necesidad de que las referencias siempre transmitan información de control a toda la red.
- **Primer** protocolo donde los mecanismos de enrutamiento y posicionamiento colaboran entre sí en lugar de interferirse.

6.3. Trabajo futuro

Eliminar del todo los problemas de incertidumbre, inconsistencia y ambigüedad en la estimación de posición.

- Se propone sustituir el método de Newton por un método combinatorio que garantice la convergencia a único punto del método de multilateración probabilística. (Actualmente en desarrollo).

Desarrollo del primer protocolo geocast que no requiera que todos los nodos estén equipados con GPS.

Evaluación del desempeño de POSTAL PRIME en escenarios como:

- Redes de vehículos (VANETs).
- Redes de vehículos aéreos no tripulados (UAVs).

Implementación de POSTAL PRIME y Multilateración Probabilística en dispositivos reales.

Apéndice A

Derivación del valor esperado de longitud de un salto en una red 3D

En esta sección se presenta la derivación de la Ecuación 3.8, la cual es empleada para calcular el valor *promedio de longitud de un salto* (\bar{l}) en la red donde la densidad de nodos (λ) es constante. Esta fórmula es una extensión 3D del resultado (Ecuación A.1) presentada por Kleinrock en [30].

$$\bar{l} = R(1 + e^{-\lambda\pi R^2} - \int_{-1}^1 e^{-\lambda R^2 [\cos^{-1}(t) - t\sqrt{1-t^2}]} dt) \quad (\text{A.1})$$

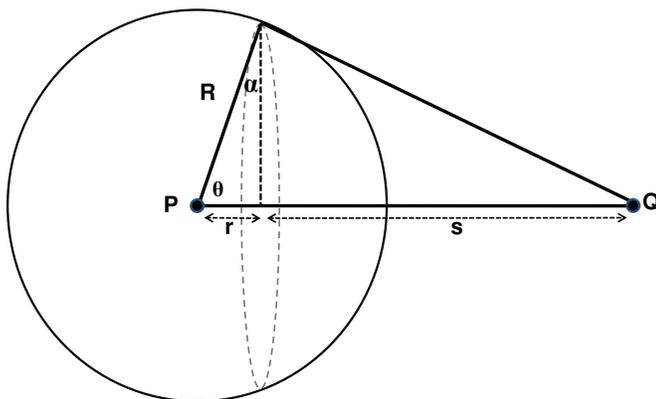


Figura A.1: Derivación del valor esperado de la longitud de un salto en una red 3D.

La Figura A.1 ilustra de manera general la idea. En la figura, P y Q denotan nodos fuente y destino, respectivamente. El promedio de longitud del primer salto que está en un camino más corto (en saltos) desde P a Q es definido como el progreso hecho hacia Q saltando a un nodo localizado dentro del rango de transmisión R . Hay que tener en cuenta que el progreso hacia Q se lleva a cabo saltando a cualquier punto de la superficie de la esfera con centro en Q y radio s igual a r . También debe considerarse que πR^2 es el área del un disco de radio R y $R^2 [\cos^{-1}(t) - t\sqrt{1-t^2}]$ es el área del un segmento de radio circular R y altura $R - r$. Por lo tanto multiplicando estos valores por λ se obtiene

el número medio de nodos en esas áreas.

Entonces, para estimar el progreso esperado hacia Q en 3D, se puede seguir el mismo enfoque y calcular el número medio de nodos en una esfera de radio R y en un casquete esférico de radio R y altura $R - r$. Finalmente, el resultado se muestra en la Ecuación A.2 donde $t = r/R$ and $N = \frac{4}{3}\lambda\pi R^3$.

$$\bar{l} = R(1 + e^{-N} - \int_{-1}^1 e^{\frac{-N}{4}(2-3t+t^3)} dt) \quad (\text{A.2})$$

Apéndice B

Productos de investigación

A continuación se despliegan los productos de investigación que se obtuvieron dentro mi período de formación doctoral:

Publicaciones en revista internacional

1. A probabilistic Approach to Location Estimation in MANETs. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks Journal. **Anabel Pineda Briseño**, Rolando Menchaca Méndez, Edgar Chávez, Giovanni Guzmán Lugo, Ricardo Menchaca Méndez, Rolando Quintero, Miguel Torres, Marco Moreno y Juan Luis Díaz de León. (Aceptado).

Publicaciones en congreso internacional

1. Entorno Ubicuo para la Interoperabilidad de Dispositivos Móviles. **Anabel Pineda Briseño**, Giovanni Guzmán Lugo, Rolando Menchaca-Méndez. IX Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico CIINDET 2011. Noviembre 22-24, 2011. Cuernavaca, Morelos, México.

Ponencias en congreso internacional

1. Entorno Ubicuo para la Interoperabilidad de Dispositivos Móviles. IX Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico CIINDET 2011. Noviembre 22-24, 2011. Cuernavaca, Morelos, México.
2. Análisis comparativo de algoritmos de posicionamiento para MANETs empleando modelos de propagación 2D y 3D. III Encuentro de Mujeres en Computación 2013. Temuco Chile. Noviembre de 2013.
3. Enrutamiento y posicionamiento ingregado en redes móviles ad hoc. III Encuentro de Mujeres en Computación 2013. Temuco Chile. Noviembre de 2013.

Publicaciones en revista de divulgación nacional

1. iCare: sistema ubicuo de monitoreo y cuidado personal: una mirada hacia el cómputo ubicuo. Vianney Tambonero, Rolando Menchaca-Mendez, José Giovanni Guzmán Lugo, Luis P. Sánchez y **Anabel Pineda Briseño**. Komputer Sapiens, Enero - Abril 2013. Impr. 30 Abril de 2013. Año V, Vol. I, 1000 Ejemplares, ISSN:2007-0691. (2013)

Estancia de investigación

1. Estancia de investigación en la Facultad de Informática de la Universidad de Murcia, España. Septiembre 2013. Tutor: Dr. Pedro M. Ruiz.

Conferencias

1. Posicionamiento en redes móviles ad hoc. En el marco del fomento a las nuevas tecnologías y tendencias científicas. Universidad de Matamoros. H. Matamoros, Tamps. Mayo de 2012.

Referencias

- [1] e-teach and network center. <http://e.tnc.com/etnc/Research/3DpropagationextensionforNS2/>.
- [2] Ahmad Al Hanbali, Eitan Altman, and Philippe Nain. A survey of tcp over ad hoc networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 7(1-4):22–36, 2005.
- [3] Arisu An, Hae-Duck J Jeong, Jiyoung Lim, and WooSeok Hyun. Design and implementation of location-based sns smartphone application for the disabled population. In *Sixth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing*, pages 365–370. IEEE, 2012.
- [4] Joshua N Ash and Randolph L Moses. Sensor localization error decomposition: Theory and applications. In *IEEE/SP 14th Workshop on Statistical Signal Processing, 2007. SSP'07*, pages 660–664. IEEE, 2007.
- [5] Osamah S Badarneh and Michel Kadoch. Multicast routing protocols in mobile ad hoc networks: a comparative survey and taxonomy. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2009:26, 2009.
- [6] Stefano Basagni, Marco Conti, Silvia Giordano, and Ivan Stojmenovic. *Mobile Ad Hoc Networking: The Cutting Edge Directions*, volume 35. John Wiley & Sons, 2013.
- [7] Bhargav Bellur, Richard G Ogier, and Fred L Templin. Topology broadcast based on reverse-path forwarding (tbrpf). *draft-ietf-manet-tbrpf-02.txt*, 2001.
- [8] Dimitri P Bertsekas, Robert G Gallager, and Pierre Humblet. *Data networks*, volume 2. Prentice-Hall International, 1992.
- [9] SIG Bluetooth. Specification of the bluetooth system, version 1.1. <http://www.bluetooth.com>, 2001.
- [10] Nirupama Bulusu, John Heidemann, and Deborah Estrin. Gps-less low-cost outdoor localization for very small devices. *IEEE Personal Communications*, 7(5):28–34, 2000.
- [11] Federico Cali, Marco Conti, and Enrico Gregori. Ieee 802.11 protocol: design and performance evaluation of an adaptive backoff mechanism. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 18(9):1774–1786, 2000.

-
- [12] Ian D Chakeres and Elizabeth M Belding-Royer. Aodv routing protocol implementation design. In *24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2004. Proceedings.*, pages 698–703. IEEE, 2004.
- [13] Imrich Chlamtac, Marco Conti, and Jennifer J-N Liu. Mobile ad hoc networking: imperatives and challenges. *Ad Hoc Networks*, 1(1):13–64, 2003.
- [14] Thomas Clausen, Philippe Jacquet, Cédric Adjih, Anis Laouiti, Pascale Minet, Paul Muhlethaler, Amir Qayyum, Laurent Viennot, et al. Optimized link state routing protocol (olsr). 2003.
- [15] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee et al. Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications, 1997.
- [16] Bertrand David, Chuantao Yin, Yun Zhou, Tao Xu, Bingxue Zhang, Huiliang Jin, and Rene Chalon. Smart-city: Problematics, techniques and case studies. In *8th International Conference on Computing Technology and Information Management*, volume 1, pages 168–174. IEEE, 2012.
- [17] NFC Record Type Definition. Nfc forum technical specification, 2006.
- [18] Sonja Filiposka and Dimitar Trajanov. Terrain-aware three-dimensional radio-propagation model extension for ns2. *Simulation*, 87(1-2):7–23, 2011.
- [19] GA Halls. Hiperlan: the high performance radio local area network standard. *Electronics & communication engineering journal*, 6(6):289–296, 1994.
- [20] Mike Hazas, James Scott, and John Krumm. Location-aware computing comes of age. *Computer*, 37(2):95–97, 2004.
- [21] Tian He, Chengdu Huang, Brian M Blum, John A Stankovic, and Tarek Abdelzaher. Range-free localization schemes in large scale sensor networks. In *Proceedings of the 9th annual international conference on mobile computing and networking*, pages 81–95. ACM, 2003.
- [22] Donald Hearn and M Pauline Baker. *Computer graphics, C version*, volume 2. Prentice Hall Upper Saddle River, 1997.
- [23] Jeffrey Hightower and Gaetano Borriello. Location systems for ubiquitous computing. *Computer*, 34(8):57–66, 2001.
- [24] Jeroen Hoebeke, Ingrid Moerman, Bart Dhoedt, and Piet Demeester. An overview of mobile ad hoc networks: Applications and challenges. *JOURNAL-COMMUNICATIONS NETWORK*, 3(3):60–66, 2004.
- [25] Bernhard Hofmann-Wellenhof, Herbert Lichtenegger, and James Collins. Global positioning system. theory and practice. *Global Positioning System. Theory and practice.*, by Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Collins, J.. Springer, Wien (Austria), 1993, 347 p., ISBN 3-211-82477-4, Price DM 79.00. ISBN 0-387-82477-4 (USA)., 1, 1993.

-
- [26] Bernhard Hofmann-Wellenhof, Herbert Lichtenegger, and James Collins. *Global Positioning System: Theory and Practice*. Springer, fifth edition, 2001.
- [27] Chen Hongyang, Kaoru Sezaki, Deng Ping, and Hing Cheung So. An improved dv-hop localization algorithm with reduced node location error for wireless sensor networks. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 91(8):2232–2236, 2008.
- [28] Mario Joa-Ng and I-Tai Lu. A peer-to-peer zone-based two-level link state routing for mobile ad hoc networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 17(8):1415–1425, 1999.
- [29] David B Johnson, David A Maltz, Josh Broch, et al. Dsr: The dynamic source routing protocol for multi-hop wireless ad hoc networks. *Ad hoc networking*, 5:139–172, 2001.
- [30] Leonard Kleinrock and John Silvester. Optimum transmission radii for packet radio networks or why six is a magic number. In *Proceedings of the IEEE National Telecommunications Conference*, volume 4, pages 1–4. Birmingham, Alabama, 1978.
- [31] Y-B Ko and Nitin H Vaidya. Geocasting in mobile ad hoc networks: Location-based multicast algorithms. In *Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, 1999. Proceedings. WMCSA '99.*, pages 101–110. IEEE, 1999.
- [32] Changling Liu and Jörg Kaiser. *A survey of mobile ad hoc network routing protocols*. Universität Ulm, Fakultät für Informatik., 2003.
- [33] Yunhao Liu, Zheng Yang, Xiaoping Wang, and Lirong Jian. Location, localization, and localizability. *Journal of Computer Science and Technology*, 25(2):274–297, 2010.
- [34] Natarajan Meghanathan. Survey and taxonomy of unicast routing protocols for mobile ad hoc networks. *The International Journal on Applications of Graph Theory in Wireless Ad hoc Networks and Sensor Networks*, 1(1):1–21, 2009.
- [35] Rolando Menchaca-Mendez and JJ Garcia-Luna-Aceves. An interest-driven approach to integrated unicast and multicast routing in manets. In *IEEE International Conference on Network Protocols, ICNP.*, pages 248–257. IEEE, 2008.
- [36] David Munoz, Frantz Bouchereau Lara, Cesar Vargas, and Rogerio Enriquez-Caldera. *Position location techniques and applications*. Academic Press, 2009.
- [37] Radhika Nagpal, Howard Shrobe, and Jonathan Bachrach. Organizing a global coordinate system from local information on an ad hoc sensor network. In *Information Processing in Sensor Networks*, volume 2634, pages 333–348. Springer Berlin Heidelberg, 2003.
- [38] Dragos Niculescu and Badri Nath. Ad hoc positioning system (aps). In *Proc. of IEEE GLOBECOM*, volume 5, pages 2926–2931. IEEE, 2001.

-
- [39] Vincent Douglas Park and M Scott Corson. A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks. In *INFOCOM'97. Sixteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE*, volume 3, pages 1405–1413. IEEE, 1997.
- [40] Charles E Perkins and Pravin Bhagwat. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsv) for mobile computers. In *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, volume 24, pages 234–244. ACM, 1994.
- [41] JW Powers. Range trilateration error analysis. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, (4):572–585, 1966.
- [42] Lionel Reyero and Gilles Delisle. A pervasive indoor-outdoor positioning system. *Journal of Networks*, 3(8):70–83, 2008.
- [43] Lionel Reyero and Gilles Y Delisle. Always best located, a pervasive positioning system. In *Wireless Pervasive Computing, 2007. ISWPC'07. 2nd International Symposium on*. IEEE, 2007.
- [44] Teemu Roos, Petri Myllymaki, and Henry Tirri. A statistical modeling approach to location estimation. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 1(1):59–69, 2002.
- [45] Elizabeth M Royer. Multicast ad hoc on-demand distance vector (maodv) routing. *IETF Internet Draft, draft-ietf-manet-maodv-00. txt*, 2000.
- [46] Andreas Savvides, Wendy L Garber, Randolph L Moses, and Mani B Srivastava. An analysis of error inducing parameters in multihop sensor node localization. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 4(6):567–577, 2005.
- [47] Ali H Sayed, Alireza Tarighat, and Nima Khajehnouri. Network-based wireless location: challenges faced in developing techniques for accurate wireless location information. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 22(4):24–40, 2005.
- [48] Steven Shepard. *RFID: radio frequency identification*. McGraw-Hill New York, 2005.
- [49] Chia-Yen Shih and Pedro José Marrón. Cola: Complexity-reduced trilateration approach for 3d localization in wireless sensor networks. In *Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM), 2010 Fourth International Conference on*, pages 24–32. IEEE, 2010.
- [50] Network Simulator. ns-2, 1989.
- [51] Federico Thomas and Lluís Ros. Revisiting trilateration for robot localization. *Robotics, IEEE Transactions on*, 21(1):93–101, 2005.
- [52] Ravindra Vaishampayan and Jose Joaquin Garcia-Luna-Aceves. Efficient and robust multicast routing in mobile ad hoc networks. In *Mobile Ad-hoc and Sensor Systems, 2004 IEEE International Conference on*, pages 304–313. IEEE, 2004.

-
- [53] Zheng Wang, Hamid R Sadjadpour, and JJ Garcia-Luna-Aceves. A unifying perspective on the capacity of wireless ad hoc networks. In *INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE*, pages 211–215. IEEE, 2008.
- [54] Mark Weiser. The computer for the 21st century. *Scientific American*, 265(3):94–104, 1991.
- [55] Kamin Whitehouse, Chris Karlof, and David Culler. A practical evaluation of radio signal strength for ranging-based localization. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 11(1):41–52, 2007.
- [56] Kamin Whitehouse, Chris Karlof, and David Culler. A practical evaluation of radio signal strength for ranging-based localization. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 11(1):41–52, 2007.
- [57] Brad Williams and Tracy Camp. Comparison of broadcasting techniques for mobile ad hoc networks. In *Proceedings of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pages 194–205. ACM, 2002.
- [58] Chun-Wei Wu and YC Tay. Amris: A multicast protocol for ad hoc wireless networks. In *Military Communications Conference Proceedings, 1999. MILCOM 1999. IEEE*, volume 1, pages 25–29. IEEE, 1999.
- [59] Xing Xiong, Uyen Trang Nguyen, and Hoang Lan Nguyen. Preemptive multicast routing in mobile ad-hoc networks. In *International Conference on Networking, International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies, 2006. ICN/ICONS/MCL 2006.*, pages 68–74. IEEE, 2006.
- [60] Zheng Yang and Yunhao Liu. Quality of trilateration: Confidence-based iterative localization. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 21(5):631–640, 2010.
- [61] Yunjung Yi, Sung-Ju Lee, William Su, and Mario Gerla. On-demand multicast routing protocol (odmrp) for ad hoc networks. *IETF MANET Working Group Internet-Draft*, 2002.
- [62] Liu Ying, Qian Zhi-hong, Liu Dan, and Zhong Hui. A dv-hop positioning algorithm for wireless sensor network based on detection probability. In *Proceedings of the 2009 Fifth International Joint Conference on INC, IMS and IDC*, pages 453–456. IEEE, 2009.