



DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA DE SISTEMAS Y
COMPUTADORES

Evaluación y Modelado de Redes Oportunistas

Tesis presentada en cumplimiento parcial de los requisitos
para el grado de Doctor en Filosofía de la Informática

Por

Leonardo Chancay García

Directores:

Dr. Pietro Manzoni

Dr. Enrique Hernández Orallo



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Valencia, España

Junio, 2019

A mi Familia.

Ellos son mi vida.

La mejor forma de predecir el futuro es crearlo.

Peter Drucker

Agradecimientos

QUIERO agradecer infinitamente a mis directores Pietro Manzoni y Enrique Hernández Orallo, por el gran apoyo y guía brindada para la realización de esta tesis doctoral, sin todas esas horas de ayuda esta tesis no hubiera sido posible.

A los profesores Carlos Calafate y Juan Carlos Cano, por los grandes consejos para hacer un mejor trabajo y que muchas veces fueron palabras de aliento para seguir adelante.

Un enorme gracias a todos los miembros del Grupo de Redes de Computadores - GRC, por el apoyo en los buenos y malos momentos. A todos los amigos de la Universitat Politècnica de València, muy en especial a los del master.

Especialmente gracias a mi mamá, por todo el apoyo y por los mensajes de aliento cada día de estos años lejos de casa, a mi padre y mis hermanos, a Mathias y Yeudiel por esperarme aunque no he estado tan presente estos años. A Santi por apoyarme y aguantarme en este proceso. A mi tía Mary, Edmundo, Marita y Mabel que han sido un pilar importante y me han hecho sentir siempre como en casa. Los amo.

Finalmente, quiero agradecer a la República del Ecuador junto con la “Secretaría de Educación Superior, Ciencia y Tecnología e Innovación” - SENESCYT, por su programa de apoyo y financiar mis estudios.

Leonardo Chancay García
Valencia, 3 de julio de 2019

Resumen

LA DISPONIBILIDAD y el rendimiento de las actuales tecnologías inalámbricas como WiFi o 4G, pueden tener serios problemas de congestión y propagación, especialmente en espacios muy concurridos, o bien ser inaccesibles en sitios remotos o con baja densidad de personas. La utilización de las Redes Oportunistas en este tipo de escenarios puede ser la solución a estos problemas. Estas redes se basan en la oportunidad de intercambiar mensajes utilizando algún tipo de tecnología de comunicación directa entre dispositivos móviles como son Bluetooth o WiFi.

El rendimiento de las Redes Oportunistas depende principalmente de la movilidad de los nodos y los protocolos de enrutamiento utilizados, siendo estos últimos los encargados de decidir como son intercambiados los mensajes cuando un contacto ocurre, intentando encontrar la mejor ruta para que un mensaje alcance su destino. Por otra parte, la eficiencia de la difusión en estas redes está ligada especialmente a la movilidad de los usuarios y al comportamiento humano. Entonces, para el análisis y la evaluación del rendimiento de las Redes Oportunistas es necesario considerar tanto los aspectos técnicos relacionados con los protocolos de encaminamiento, como los aspectos de la movilidad humana.

Esta tesis doctoral se centra principalmente en evaluar la disseminación de la información usando redes oportunistas en escenarios urbanos, en los que existen diferentes densidades y tasas de renovación de personas, es decir, con usuarios que puedan entrar y salir del escenario evaluado. Dado que la existencia de este tipo de trazas reales es muy limitada, en esta tesis se plantea la generación de este tipo de trazas de forma sintética. Para ello, mediante el uso de un simulador de movilidad peatonal, se han generado trazas realistas de movilidad con diferentes grados de densidad y tasas de renovación de usuarios con el objeto de evaluar diferentes aspectos de la difusión de mensajes en las Redes Oportunistas.

El análisis de las características temporales y espaciales de estas trazas generadas refleja el realismo de los escenarios que se han considerado. Además, los experimentos relativos a la difusión de mensajes realizados con estas trazas, confirman que la tasa de renovación tiene un gran impacto en el rendimiento de los protocolos, lo que es particularmente evidente cuando el tamaño de los mensajes es mayor.

Por otra parte, también se ha realizado el estudio, utilizando en este caso trazas reales, de la difusión de información a través de las Redes Oportunistas Vehiculares. Ya que de la misma manera la movilidad de estos vehículos está ligada al comportamiento humano, nos hemos centrado en la diseminación de la información en determinadas horas del día dependiendo del número de vehículos en circulación, debido a que este aspecto tiene un gran impacto en el reenvío de datos. Los resultados de estos experimentos confirman que los dos principales factores que afectan a la difusión de información son el grado de movilidad y el tamaño de mensaje.

Aunque es bien sabido que al aumentar la densidad de nodos aumenta la velocidad de difusión, mostramos que, al mantener la densidad de nodos fija, las tasas de renovación más altas hacen que la relación de entrega disminuya. Además, descubrimos que la relación entre el tamaño del mensaje y la duración del contacto también es un factor clave, lo que demuestra que la transmisión de los mensajes grandes puede llevar a un rendimiento general muy bajo.

Basándonos en todo lo expuesto anteriormente, se ha propuesto una mejora al protocolo Epidemic, a la que hemos denominado *EpidemicX2*, que se basa en la fragmentación de los datos a ser enviados con el fin de aprovechar la corta duración de los contactos para aumentar así la posibilidad de su entrega. Este protocolo es particularmente efectivo para la difusión de los mensajes grandes. Los resultados muestran que la tasa de entrega se incrementa, el tiempo promedio en la entrega se reduce, sin un sustancial incremento en términos de sobrecarga.

Abstract

THE AVAILABILITY and performance of current wireless technologies such as WiFi or 4G, can have severe problems of congestion and information diffusion, especially in crowded spaces, or, on the other side, be inaccessible in places with a low density of people. The use of Opportunistic Networks in these types of scenarios can be a solution to these problems. These networks are based on the opportunity to exchange messages using some type of direct communication technology between nearby mobile devices such as Bluetooth or WiFi.

The performance of these networks depends mainly on the mobility of the nodes and the routing protocols used. The goal of these protocols is to decide how messages are exchanged when a pair of nodes are in contact, trying to find the best route for a message to reach its destination. The efficiency of the diffusion in these networks is related mainly to the mobility of users and human behaviour. Therefore, for the analysis and evaluation of the performance of the Opportunistic Networks, it is necessary to consider both the technical aspects related to the routing protocols, as well as the aspects of human mobility.

This thesis mainly focuses on evaluating the dissemination of information using Opportunistic Networks in urban scenarios, in which there are different densities and renewal rates of people, that is, with users who can enter and leave the evaluated scenario. Given that the existence of this type of real traces is very limited, this thesis proposes the generation of realistic traces. For this, through the use of a pedestrian mobility simulator, realistic traces of mobility have been defined with different degrees of density and renewal rates of users to evaluate different aspects of the Opportunistic Network with this approach.

The analysis of the temporal and spatial characteristics of these generated traces reflects the realism of the scenarios that have been considered. The exper-

iments related to the diffusion of messages made with these traces, confirm that the renewal rate has a high impact on the performance of the protocols, which is particularly evident when the message size is longer.

Furthermore, considering vehicular scenarios, a study has also been carried out using real traces, following the same methodology to evaluate the dissemination of information. Since in the same way the mobility of these vehicles is linked to human behaviour, we have focused on the dissemination of information at certain times of the day depending on the number of vehicles in circulation, since this aspect has a significant impact on data diffusion. The results of all these experiments show that the diffusion of contents is affected mainly by two factors: degree of mobility and message size.

Although it is well known that increasing the density of nodes increases the speed of diffusion, we show that, by maintaining the density of fixed nodes, the higher renewal rates cause the delivery ratio to decrease. In addition, we discovered that the relationship between message size and contact duration is also a key factor, showing that large messages can lead to very reduced overall performance.

Based on these results, an improvement to the Epidemic protocol has been proposed, called *EpidemicX2*, which is based on the fragmentation of the data to be sent in order to take advantage of the short duration of the contacts. This protocol is particularly effective for the dissemination of large messages. The results show that the delivery rate increases, the average time in the delivery is reduced, without a substantial increase in terms of overload.

Resum

LA DISPONIBILITAT i el rendiment de les actuals tecnologies sense fil com WiFi o 4G, poden tindre seriosos problemes de congestió i propagació, especialment en espais molt concorreguts, o bé ser inaccessibles en llocs remots o amb baixa densitat de persones. La utilització de les Xarxes Oportunistes en este tipus d'escenaris pot ser la solució a estos problemes. Estes xarxes es basen en l'oportunitat d'intercanviar missatges utilitzant algun tipus de tecnologia de comunicació directa entre dispositius mòbils com són Bluetooth o WiFi.

El rendiment de les Xarxes Oportunistes depén principalment de la mobilitat dels nodes i els protocols d'enrutamiento utilitzats, sent estos últims els encarregats de decidir com són intercanviats els missatges quan un contacte ocorre, intentant trobar la millor ruta perquè un missatge abast el seu destí. D'altra banda, l'eficiència de la difusió en estes xarxes està lligada especialment a la mobilitat dels usuaris i al comportament humà. Llavors, per a l'anàlisi i l'avaluació del rendiment de les Xarxes Oportunistes és necessari considerar tant els aspectes tècnics relacionats amb els protocols d'acarrerament, com els aspectes de la mobilitat humana.

Esta tesi doctoral se centra principalment a avaluar la disseminació de la informació usant xarxes oportunistes en escenaris urbans, en els que hi ha diferents densitats i taxes de renovació de persones, és a dir, amb usuaris que puguen entrar i eixir de l'escenari avaluat. Atés que l'existència d'este tipus de traces reals és molt limitada, en esta tesi es planteja la generació d'este tipus de traces de forma sintètica. Per a això, per mitjà de l'ús d'un simulador de mobilitat de vianants, s'han generat traces realistes de mobilitat amb diferents graus de densitat i taxes de renovació d'usuaris amb l'objecte d'avaluar diferents aspectes de la difusió de missatges en les Xarxes Oportunistes.

L'anàlisi de les característiques temporals i espacials d'estes traces generades reflectix el realisme dels escenaris que s'han considerat. A més, els experiments relatius a la difusió de missatges realitzats amb estes traces, confirmen que la taxa de renovació té un gran impacte en el rendiment dels protocols, la qual cosa és particularment evident quan la grandària dels missatges és major.

D'altra banda, també s'ha realitzat l'estudi, utilitzant en este cas traces reals, de la difusió d'informació a través de les Xarxes Oportunistes Vehiculars. Ja que de la mateixa manera la mobilitat d'estos vehicles està lligada al comportament humà, ens hem centrat en la disseminació de la informació en determinades hores del dia dependent del nombre de vehicles en circulació, pel fet que este aspecte té un gran impacte en el reexpedició de dades. Els resultats d'estos experiments confirmen que els dos principals factors que afecten la difusió d'informació són el grau de mobilitat i la grandària de missatge.

Encara que és ben sabut que a l'augmentar la densitat de nodes augmenta la velocitat de difusió, mostrem que, al mantindre la densitat de nodes fixa, les taxes de renovació més altes fan que la relació d'entrega disminuisca. A més, descobrim que la relació entre la grandària del missatge i la duració del contacte també és un factor clau, la qual cosa demostra que la transmissió dels missatges grans pot portar a un rendiment general molt davall.

Basant-nos en tot el que exposa anteriorment, s'ha proposat una millora al protocol Epidemic, a la que hem denominat *EpidemicX2*, que es basa en la fragmentació de les dades a ser enviats a fi d'aprofitar la curta duració dels contactes per a augmentar així la possibilitat del seu entrega. Este protocol és particularment efectiu per a la difusió dels missatges grans. Els resultats mostren que la taxa d'entrega s'incrementa, el temps mitjana en l'entrega es reduïx, sense un substancial increment en termes de sobrecàrrega.

Índice General

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Índice de Figuras	XVII
Índice de Tablas	XIX
1 Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Motivación	3
1.3. Objetivos	4
1.4. Estructura de la Tesis	5
2 Estado del Arte	7
2.1. Introducción	7
2.2. Redes Oportunistas: Definición	7
2.3. Protocolos de Enrutamiento	8
2.4. Metodologías de Evaluación	12
2.5. Modelos de Movilidad	15
2.6. Modelos de Tráfico	20
2.7. Herramientas de Simulación	21
2.8. Resumen	25
3 Definición y Evaluación de Escenarios	27

3.1. Introducción	27
3.2. Procedimiento para la Generación de Escenarios Peatonales	28
3.3. Evaluación de la Movilidad en los Escenarios Generados	36
3.4. Escenarios Vehiculares	46
3.5. Conclusiones	50
4 Evaluación de la Transmisión de Mensajes en Escenarios con Renovación de Personas	53
4.1. Introducción	53
4.2. Métricas del Rendimiento	53
4.3. Evaluación con los Escenarios de la <i>Plaza</i>	55
4.4. Evaluación con los Escenarios de la <i>Estación</i>	63
4.5. Conclusiones	67
5 Mejora de la Difusión de Mensajes de Gran Tamaño	69
5.1. Introducción	69
5.2. Mejora en la Difusión de los Mensajes Grandes con EpidemicX2	70
5.3. Evaluación con los Escenarios <i>Peatonales</i>	73
5.4. Evaluación con los Escenarios <i>Vehiculares</i>	84
5.5. Impacto de la Fragmentación de Mensaje	93
5.6. Conclusiones	97
6 Conclusiones, Publicaciones y Trabajo Futuro	99
6.1. Conclusiones	99
6.2. Publicaciones	101
6.3. Trabajo Futuro	104
Bibliografía	107

Índice de Figuras

2.1. Protocolos de Enrutamiento	9
2.2. Exactitud versus Costo de los Métodos de Evaluación	15
2.3. Vista de los escenarios generados con PedSim	22
2.4. Visión general de ONE	23
3.1. Localización de los escenarios evaluados	28
3.2. Esquema para la evaluación de los escenarios reales	29
3.3. Escenario de la Plaza de la Virgen en Valencia, España	31
3.4. Escenario de la Estación de Alameda en Valencia, España	34
3.5. Número de nodos en los escenarios de la Estación	39
3.6. CDF de la duración de los contactos en los escenarios peatonales	41
3.7. Número de contactos en los escenarios de la Plaza	42
3.8. Número de contactos en los escenarios de la Estación	43
3.9. Mapas de calor de los diferentes escenarios peatonales generados	44
3.10. Grafos de los contactos para diferentes escenarios peatonales generados	45
3.11. Traza vehicular de Roma	48
3.12. Traza vehicular de San Francisco	49
3.13. CDF de la duración de los contactos en los escenarios vehiculares	50
4.1. Delivery ratio para los protocolos de difusión en la Plaza	58
4.2. Delivery time para los protocolos de difusión en la Plaza	60
4.3. Overhead para los protocolos de difusión en la Plaza	61
4.4. Delivery ratio para los protocolos de difusión en la Estación (14-15h)	64
4.5. Número de nodos con copia del mensaje en la Estación (14-15h)	65

ÍNDICE DE FIGURAS

4.6. Delivery time para los protocolos de difusión en la Estación (14-15h) . . .	66
4.7. Overhead para los protocolos de difusión en la Estación (14-15h) . . .	66
5.1. Funcionamiento del protocolo EpidemicX2	71
5.2. Delivery ratio con EpidemicX2 en los escenarios de la Plaza	75
5.3. Número de nodos con copia del mensaje en la Plaza (media renovación)	76
5.4. Delivery time con EpidemicX2 en los escenarios de la Plaza	77
5.5. Overhead con EpidemicX2 en los escenarios de la Plaza	78
5.6. Delivery ratio con EpidemicX2 en los escenarios de la Estación	80
5.7. Número de nodos con copia del mensaje en la Estación (14-15h) . . .	81
5.8. Delivery time con EpidemicX2 en los escenarios de la Estación	82
5.9. Overhead con EpidemicX2 en los escenarios de la Estación	83
5.10. Delivery ratio con EpidemicX2 en la ciudad de Roma	86
5.11. Número de nodos con copia del mensaje en la ciudad de Roma	87
5.12. Delivery time con EpidemicX2 en la ciudad de Roma	88
5.13. Overhead con EpidemicX2 en la ciudad de Roma	89
5.14. Delivery ratio con EpidemicX2 en la ciudad de San Francisco	90
5.15. Número de nodos con copia del mensaje en la ciudad de San Francisco	92
5.16. Delivery time con EpidemicX2 en la ciudad de San Francisco	93
5.17. Overhead con EpidemicX2 en la ciudad de San Francisco	94
5.18. Delivery ratio y delivery time en la Plaza (alta renovación) con dife- rentes estrategias de fragmentación de mensaje	95
5.19. Delivery ratio y delivery time en la Estación (14-15h) con diferentes estrategias de fragmentación de mensaje	96

Índice de Tablas

2.1. Resumen de las Técnicas para la Evaluación de Rendimiento de una Red Oportunista	19
3.1. Principales parámetros de los escenarios de la Plaza.	32
3.2. Principales parámetros de los escenarios de la Estación	35
3.3. Parámetros fijos de simulación de los escenarios Peatonales	38
3.4. Número de contactos y el promedio de su duración para los escenarios de la Plaza	40
3.5. Número de contactos y el promedio de su duración para los escenarios de la Estación	40
3.6. Rangos horarios de las trazas de Roma y San Francisco y número de vehículos activos	47
4.1. Parámetros fijos de simulación para los escenarios de la Plaza	56
4.2. Protocolos evaluados y sus parámetros de configuración para los escenarios de la Plaza	57
4.3. Parametros fijos de simulación para los escenarios de la Estación	63
5.1. Número de contactos y el promedio de su duración para los escenarios de la Plaza con nodos fijos para difundir información	70
5.2. Parámetros fijos de simulación de los escenarios Vehiculares	85

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

En espacios concurridos, como estaciones de trenes, centros comerciales, etc., la disponibilidad y el rendimiento de las actuales tecnologías como WiFi o 4G, pueden verse muy limitadas e incluso seriamente afectadas por problemas de propagación y congestión. El uso en estos escenarios de las *Redes Oportunistas* (Opportunistic Networks, OppNets) merece la pena ser considerado ya que se están convirtiendo en una alternativa realmente prometedora. Las Redes Oportunistas [61, 39] se basan en la posibilidad de intercambiar mensajes entre los dispositivos cercanos, estableciendo algún tipo de comunicación directa y local, por ejemplo a través de Bluetooth o canales WiFi direct. Las Redes Oportunistas tienen muchas aplicaciones en diferentes campos, como redes de sensores, monitoreo de animales silvestres, etc. y en general, en la difusión de la información entre los dispositivos móviles.

El rendimiento de las Redes Oportunistas depende principalmente de la movilidad de los nodos y de los algoritmos de enrutamiento, siendo estos últimos los encargados de decidir como son intercambiados los mensajes cuando un contacto ocurre, intentando encontrar la mejor ruta para que un mensaje alcance su destino. La movilidad de estos nodos está fuertemente ligada a la movilidad humana, ya que estos dispositivos móviles se pueden comunicar únicamente cuando los humanos entran en contacto. Por lo tanto, la evaluación del rendimiento de las

1. INTRODUCCIÓN

redes oportunistas sobre escenarios realistas es un problema complejo, donde se deben de considerar tanto aspectos técnicos relacionados con los protocolos, como aquellos relacionados con la movilidad humana.

En esta tesis, primeramente estudiaremos el impacto que tiene la movilidad humana en la difusión de la información, por lo que hemos recreado dos escenarios peatonales, creando una nueva metodología para crear y evaluar este tipo de escenarios urbanos. Concretamente, uno de los objetivos de esta tesis es evaluar la eficiencia de los protocolos de enrutamiento de las Redes Oportunistas para la transmisión de mensajes en escenarios con diferentes grados de renovación de personas, considerando que el número de personas en un escenario real puede ser altamente variable en el tiempo, y que este aspecto puede impactar en la eficiencia de la entrega del mensaje. Sin embargo, la mayoría de los protocolos de enrutamiento se han desarrollado y evaluado considerando escenarios con un número constante de usuarios.

Esta limitación es principalmente debida a las actuales metodologías usadas para evaluar OppNets [19]. Típicamente, evaluar las OppNets combina una herramienta de simulador de red con trazas de movilidad realistas. A pesar de que existe una amplia colección de datos obtenidos de la observación de la movilidad de los nodos en escenarios reales, la evaluación se restringe a las condiciones de esos escenarios, condicionando severamente la evaluación del rendimiento de los protocolos de difusión.

Por ello, proponemos una solución practica a este problema que se basa en el uso de un simulador de movilidad peatonal con el fin de generar trazas de movilidad de personas en lugares y horarios específicos, lo que nos ha permitido evaluar la variación del flujo temporal al construir estos escenarios realistas. Siguiendo esta idea, hemos optado por la creación de trazas externas usando PEDSIM [27] (un simulador de peatones) para ser usadas con el simulador ONE [48]. Adicionalmente, hemos evaluado el efecto que tiene la variación temporal del flujo de nodos en el caso de una Red Oportunista Vehicular, utilizando dos trazas vehiculares reales.

En detalle, hemos creado dos escenarios peatonales a través de mediciones y recolección de datos reales, replicando el comportamiento de los peatones y su movilidad real. Los escenarios han sido creados en PedSim, con el fin de evaluar el impacto que tiene la renovación de personas en un lugar. Los lugares que hemos recreado son escenarios abiertos donde las personas pueden entrar o salir, permitiendo la renovación deseada. A partir de estos escenarios, generamos diferentes trazas de movilidad con diferentes tasas de renovación y afluencia de personas, desde la no renovación hasta alta renovación. El análisis de estos escenarios generados, en las dimensiones temporal y espacial, reflejan su realismo, y por tanto, la fiabilidad del enfoque que queremos dar en esta tesis. Las pruebas para la difu-

sión de la información han sido realizadas con el simulador de redes oportunistas ONE, donde las trazas se usaron para comparar el rendimiento de los diferentes protocolos de enrutamiento sobre estos escenarios.

Con respecto a los escenarios vehiculares, siguiendo el enfoque anterior, hemos creados sub-trazas con el fin de validar la movilidad con diferente intensidad de tráfico. Los experimentos se realizaron para evaluar el impacto que tiene la movilidad y el comportamiento humano, sobre las redes vehiculares en la difusión de la información.

Los resultados de las pruebas realizadas muestran que el rendimiento de los protocolos de difusión es claramente reducido cuando se incrementa el tamaño de mensaje, y que aspectos como la velocidad de desplazamiento y la renovación de los nodos, influye dramáticamente en la diseminación de un mensaje. Por lo tanto, con el objetivo de mejorar la difusión de la información hemos desarrollado el protocolo *EpidemicX2* [16], el cual consiste en dividir los mensajes grandes en partes más pequeñas con el fin de incrementar sus posibilidades de transmisión. Este protocolo ha mostrado ser muy eficiente en escenarios con peatones, donde los resultados del rendimiento del protocolo *EpidemicX2* han mostrado incrementar efectivamente la difusión de información en escenarios con diferentes densidad de peatones y vehículos, reduciendo también el retardo en la entrega y con una sobrecarga reducida, si lo comparamos con el protocolo epidémico.

En resumen, las contribuciones de esta tesis se centran en dos aspectos. Primero, hemos introducido una nueva metodología para evaluar el rendimiento de los protocolos de enrutamiento en escenarios donde la tasa de renovación puede ser configurada. Segundo, los resultados muestran que los protocolos de difusión actuales no son eficientes en escenarios donde hay un alto grado de renovación de personas. Por lo que, nuevos protocolos deben ser ideados para hacer frente a este problema, primero detectando cuando ocurren estos escenarios, y segundo, mejorando la tasa de entrega de paquetes. Por lo tanto, una manera para mejorar la difusión de estos mensajes mas grandes es el uso de nuestra propuesta, que es una modificación del protocolo Epidemic llamada *EpidemicX2*.

1.2. Motivación

Las Redes Oportunistas no usan una conexión a Internet, ni ningún tipo de infraestructura inalámbrica fija para realizar el envío de información entre sus distintos componentes. Podemos considerar a este tipo de redes como una buena alternativa para su utilización en muchos escenarios, como áreas geográficamente remotas, en donde no es posible desplegar o no está disponible ningún tipo de sistema de telecomunicación; donde por algún tipo de desastre natural o por al-

gún error humano se podría desahabilitar la infraestructura de comunicaciones; o en ambientes donde exista demasiada sobrecarga en las redes móviles volviéndose ineficientes debido a problemas de congestión. En estos contextos el envío de información de dispositivo a dispositivo es una buena solución para poder realizar la comunicación.

Existe una amplia colección de trabajos de investigación en los que los autores han propuesto modelos analíticos para difusión de mensajes, así como el análisis del rendimiento de estas redes a través de simuladores. En algunos trabajos, los investigadores han propuesto algunos prototipos de Redes Oportunistas que han llegado a ser desarrollados y desplegados. Lamentablemente, a gran escala, las personas no han optado por las Redes Oportunistas como un mecanismo para enviar información, probablemente por desconocimiento del esquema de comunicación o por la falta de estudios realistas de los escenarios aplicables.

Analizar cada una de las razones expuestas en el párrafo anterior es bastante complicado, teniendo en cuenta sobre todo, el gran uso de los dispositivos móviles. Por lo tanto, con el fin de mejorar la difusión de los mensajes y animar a las personas a utilizar este tipo de redes inalámbricas, nuestro enfoque consiste básicamente en promover la metodología que hemos desarrollado para evaluar escenarios urbanos en los que existen varios grados de renovación de usuarios y mejorar la diseminación de mensajes sin el uso de una infraestructura inalámbrica fija y permanente.

1.3. Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es el de mejorar la diseminación de la información en Redes Oportunistas como base para la evaluación de los principales factores que impactan en el rendimiento para la transmisión de los datos.

Los siguientes son los objetivos específicos que han sido propuestos para alcanzar el objetivo principal:

- Definir una metodología que nos permita evaluar escenarios en los que existan diferentes grados de renovación, afluencia de nodos o número de vehículos.
- Evaluar el rendimiento de los principales protocolos de enrutamiento existentes para Redes Oportunistas en estos tipos de escenarios.
- Mejorar la difusión de la información en los escenarios donde existen diferentes tasas de renovación, afluencia de personas o número de vehículos en circulación.

- Evaluar nuestra propuesta, denominada *EpidemicX2* para mejorar la difusión de mensajes sobre diferentes tipos de Redes Oportunistas.

1.4. Estructura de la Tesis

Esta tesis esta organizada en seis capítulos como sigue:

- **Capítulo 1. Introducción:** Presentamos una breve introducción, la motivación y objetivos que nos han llevado a la realización de esta tesis doctoral.
- **Capítulo 2. Estado del Arte:** Describimos los conceptos y aspectos generales que están relacionados con las Redes Oportunistas, que sirven como referencia para esta tesis doctoral.
- **Capítulo 3. Generación de Escenarios:** Presentamos nuestra metodología con la cual hemos generado escenarios reales, junto con la descripción de dos escenarios de trazas vehiculares reales.
- **Capítulo 4. Evaluación de la difusión de mensajes:** Realizamos una evaluación de la difusión de la información utilizando los principales protocolos de encaminamiento sobre nuestros escenarios.
- **Capítulo 5. Mejora de la difusión de mensajes:** Presentamos nuestra propuesta para la mejora de la difusión de mensajes, el protocolo *EpidemicX2*, que obtiene buenos resultados en escenarios peatonales y vehiculares.
- **Capítulo 6. Conclusiones:** Finalmente, en este capitulo describimos las conclusiones, contribuciones y trabajo futuro.

Capítulo 2

Estado del Arte

2.1. Introducción

En este capítulo presentamos una revisión del estado del arte concerniente a las Redes Oportunistas, incluyendo la definición de la terminología usada a lo largo de esta tesis. Primero, analizaremos las redes oportunistas, para posteriormente hacer una revisión de los principales protocolos de encaminamiento, las metodologías de evaluación que se pueden utilizar, además de los modelos de movilidad y los modelos de tráfico de la red para la generación de mensajes. Para finalizar veremos las dos herramientas principales que hemos usado para el desarrollo de esta tesis.

2.2. Redes Oportunistas: Definición

Las Redes Oportunistas [61, 39] se basan en la oportunidad de establecer contacto entre pares de nodos para propagar mensajes. La efectividad de este tipo de redes depende principalmente del número de contactos y la duración de estos contactos, que dependen de la movilidad de los nodos. Podemos decir que la movilidad es el principal facilitador para la disseminación de información en este tipo de redes sobre todo en escenarios urbanos [36]. La movilidad y su impacto en el rendimiento de las Redes Oportunistas ha sido ampliamente estudiado en [14, 29, 32], donde se evalúa la difusión de mensajes usando diferentes protocolos de encaminamiento, centrándose en los patrones de movilidad de los nodos. Además, en estos trabajos

los autores explican la relación existente entre los principales factores de una red oportunista a tener en cuenta, como son: la velocidad, el modelo de movilidad y la densidad de los nodos, y los lugares donde se mueven.

Además de la movilidad de los nodos, el rendimiento de las Redes Oportunistas depende también de otros dos aspectos importantes: como son reenviados y manejados localmente los mensajes, lo que se conoce como la gestión del búfer de los nodos. El primer aspecto depende de los diferentes algoritmos de encaminamiento que serán estudiados en la siguiente sección. Con respecto al manejo del buffer, en [37] los autores han demostrado que es importante implementar ciertos mecanismos para mejorar la gestión de la eficiencia del buffer, priorizando el reenvío y descarte de mensajes. Adicionalmente, los aspectos sociales también pueden ser considerados en el manejo local del buffer y el reenvío de mensajes. En este contexto, los autores de [85] han usado un análisis teórico aplicado a estas redes que de cierto modo social les permita clasificar y estudiar algunos esquemas de difusión basados en la homofilia (fenómeno de las redes sociales) para combinar la relación entre los nodos y sus intereses en los datos.

Para concluir, existen muchos trabajos de investigación sobre varios de estos factores que son muy importantes en las Redes Oportunistas, donde los autores han evaluado su desempeño desde diferentes perspectivas.

2.3. Protocolos de Enrutamiento

El objetivo de esta sección es describir los protocolos de enrutamiento usados habitualmente en las Redes Oportunistas, que son básicamente algoritmos para realizar el proceso de intercambio de información cuando los nodos están en contacto. Los protocolos de enrutamiento o *protocolos de encaminamiento*, pueden ser clasificados dependiendo de varios aspectos, como el uso o no de infraestructura, sus aplicaciones, la cantidad de información que manejan, y otros detalles. Por ejemplo, los autores de [74], en primer lugar han hecho una clasificación de acuerdo a la utilidad de cada protocolo, considerando la cantidad de información requerida por cada uno de ellos, además de realizar una cronología de la creación de estos algoritmos de enrutamiento. En [63] se presenta otra taxonomía desde la perspectiva del reenvío de información. Del mismo modo, en [61] se propone una clasificación de acuerdo al uso o no de una infraestructura de comunicación. Finalmente, en [15, 71] se puede encontrar una descripción más amplia del estado actual sobre las técnicas en el área de enrutamiento y reenvío de mensajes en las Redes Oportunistas.

En esta tesis, se ha optado por organizar los protocolos de acuerdo al número de copias de mensaje que son reenviadas, y considerando también los algoritmos



Figura 2.1: Protocolos de Enrutamiento de acuerdo al número de mensajes reenviados.

más importantes que están implementados en el simulador ONE [48]. En concreto, la figura 2.1 muestra los principales protocolos que usamos en esta tesis. A continuación se describe brevemente el funcionamiento de cada uno de estos protocolos de encaminamiento.

- **Single Copy.** Los protocolos de *Copia Simple* son aquellos que mantienen una sola copia del mensaje en la red hasta que sea entregado a su destino. Entre los principales protocolos de esta clasificación tenemos:
 - *First Contact* [44], cuando los nodos están usando el algoritmo de *primer contacto* transfieren el mensaje al primer nodo con el que se establezca contacto, repitiendo el proceso hasta que el mensaje llegue al nodo destino.
 - *Direct Delivery* [29], este protocolo de *entrega directa* se podría considerar la forma más simple de transmitir un mensaje. El mensaje será enviado sí y solo si el nodo con el que se ha establecido contacto es el nodo destino. La posibilidad de que el mensaje llegue a su destino dependerá de un contacto directo entre el nodo origen y el nodo destino.

Usando estos protocolos, solo una copia del mensaje permanece en la red por lo que la sobrecarga en la red se reduce al mínimo. La principal desventaja de este tipo de protocolos es su baja probabilidad de entrega y que el tiempo de entrega suele ser muy alto.

- **Inundación.** Los Protocolos de *Inundación* propagan un mensaje en la red. Esta clasificación considera varios niveles de inundación, desde una inundación no controlada como la que hace el protocolo *Epidemic*, hasta una inundación controlada con n número de copias.
 - (*Full*) *Epidemic* [76], el protocolo epidémico hace una copia del mensaje para todos los nodos contactados, incrementando enormemente la posibilidad de entregar el mensaje. El principal problema es la enorme sobrecarga en la red, ya que cada nodo necesita almacenar una copia del mensaje para transmitir esta copia a todos los nodos contactados que no la tengan. Otra desventaja de este protocolo es la alta demanda de ancho de banda y de almacenamiento en los nodos (búfer). Basada en esta estrategia han sido propuestas algunas variantes de este protocolo [64, 58], que tienen como común denominador la optimización de recursos.
 - *Spray & Wait* [72], es un protocolo de diseminación controlada, por lo que reduce la sobrecarga existente en la red. Con este algoritmo los nodos origen del mensaje asignan un número máximo de copias del mensaje que se pueden crear, haciendo una diseminación de n -copias del mensaje original, por lo que solo pueden existir cierto número de copias del mensaje durante un tiempo dado en la red. El funcionamiento de este protocolo consiste en dos fases, la primera fase, llamada "*spray*", donde las copias del mensaje son distribuidas a los contactos, y la segunda fase "*wait*", consiste en esperar a que una de las copias llegué a su destino. La idea es muy eficiente para controlar la sobrecarga o *overhead*. Basándose en esta idea principal se han propuesto otras variantes, todas enfocadas en mejorar la eficiencia en la entrega de datos usando diferentes estrategias en la fase de replicación. El modelo más conocido es *Spray & Wait* en modo binario (binary mode), conocido como *Binary Spray & Wait*, que a diferencia de la versión original, solo envía la mitad de las copias para optimizar mejor los recursos.
- **Probabilísticos.** Este tipo de protocolos se basan en la transmisión de copias del mensaje a los nodos que tienen mas posibilidades de contactar con el nodo destino. Por ejemplo:
 - *PRoPHET* [52], es el primer protocolo probabilístico creado para las Redes Oportunistas. Este algoritmo se basa en determinar qué nodos son los mejores para el reenvío del mensaje para que llegue al destino final. Haciendo uso de estos nodos para hacer el reenvío podemos reducir el número de copias creadas, incrementando la probabilidad de que el

mensaje llegue a su destino. Concretamente, este protocolo estima la probabilidad de que el nodo contactado pueda entregar el mensaje, basándose en el historial de contactos, reenviando el mensaje solo a los nodos que tienen alta probabilidad de entrega.

- *PRoPHET-V2* [51], es una mejora de la primer versión, donde además de varias mejoras, este protocolo considera un parámetro adicional, que es el tiempo de inter-contacto expresado en segundos, permitiendo la mejora en la probabilidad de encontrar el nodo destino, con el fin de optimizar los recursos.
- *MaxProp* [10], es otro de los enfoques probabilísticos. Difunde un mensaje sobre la red, haciendo una validación de todas las rutas posibles para cada mensaje, almacena el número de saltos y la probabilidad de que el mensaje llegué a su destino (este valor se calcula de acuerdo a los encuentros previos). Eventualmente, si el mensaje llega a su destino, se toma en cuenta solo esta ruta, y se envía un mensaje de respuesta para que todas las copias fallidas del mensaje sean eliminadas de sus nodos.

Las diferentes variaciones de PRoPHET y MaxProp son protocolos de encaminamiento que para cada nodo estiman un valor llamado “previsibilidad de entrega” o “probabilidad de entrega” [47], que a su vez se utiliza para decidir si una copia del mensaje se transmite al nodo encontrado.

- **Otros Protocolos Probabilísticos.** Los siguientes protocolos consideran aspectos como la sociabilidad de los nodos para la selección de los mejores nodos para hacer reenvíos selectivos de mensajes.
 - *Randomized Rumor Spreading (RRS)* [46], De forma similar a Epidemic, también inunda la red, pero cuando un nodo esta en contacto con otros nodos, se selecciona aleatoriamente un mensaje de los que tiene en cola o cache y lo envía a sus vecinos. Ninguno de los nodos que recibe o reenvía el mensaje sabe que mensajes tiene, por lo que no se puede garantizar que el mensaje enviado sea el mas óptimo.
 - *BubbleRap* [41], Probablemente sea una de las primeras soluciones enfocadas a algún aspecto social de los usuarios. Se centra en dos métricas sociales y estructurales, donde se habla de conceptos de comunidad y de centralidad. Cuando los mensajes son difundidos en la red, se prefieren los nodos con mayor centralidad y que sean de la misma comunidad, asumiendo que esos nodos se encontrarán antes con el destino final de la información.

- *The Friendship and Selfishness Forwarding Algorithm (FSF)* [70], Este algoritmo se basa principalmente en dos aspectos claves: la amistad y el egoísmo. Los autores han propuesto esta técnica para minimizar el uso de recursos para el reenvío de mensajes. Este protocolo realiza una validación de los nodos contactados, teniendo en cuenta varios aspectos, tales como: si los usuarios trabajan juntos, viven cerca o coinciden en algunos lugares, antes de realizar el reenvío del mensaje.

Existen otros protocolos de enrutamiento que han sido desarrollados dependiendo de otros aspectos. Por ejemplo, algunos trabajos han explorado el uso de redundancia de mensajes al dividir un mensaje usando códigos de borrado (erasure codes). Este enfoque ha sido estudiado inicialmente en [43], formulando el problema de mejorar la entrega de mensajes como un problema de optimización para obtener el número óptimo de copias redundantes. Un enfoque similar se introdujo también en [81]. Finalmente los autores de [67] han desarrollado un esquema bastante completo sobre la fragmentación de un mensaje. Proponen utilizar una replicación limitada utilizando Spray & Wait y redundancia con la utilización de código de borrado, con el fin de mejorar la difusión de los mensajes. El artículo propone un método para obtener los valores óptimos de replicación y redundancia dado un conjunto de parámetros de redes utilizando modelos Random Walk (RW) y Random Way Point (RWP) para el desplazamiento de los nodos. La aplicación de código raptor para redes de vehículos es propuesta en [12] como una forma de mejorar la eficiencia y confiabilidad de la transmisión de información.

Sin embargo, los códigos de borrado y otras formas de redundancia tienen varios inconvenientes. En primer lugar, aumenta el número de mensajes y el volumen de información generado en la red, lo que contribuye a la congestión de la red y al consumo del búfer local. En segundo lugar, los procesos de división de un mensaje y, tras la recepción de las partes requeridas, la reconstrucción del mensaje original pueden ser tareas computacionalmente intensivas y que requieren mucho tiempo de proceso, lo que aumenta también el consumo local de recursos.

2.4. Metodologías de Evaluación

A la hora de evaluar el funcionamiento y rendimiento de una red oportunista existen varias metodologías. Primeramente haremos una introducción hacia los modelos más relevantes en las Redes Oportunistas, ya sean modelos basados en mediciones reales, modelos analíticos o modelos basados en simulador; además, existen otros modelos usados para el despliegue de estas redes, como pueden ser: los modelos de movilidad, modelos de radio transmisión y modelos de tráfico. En

esta sección exploramos cada uno de estos grupos en términos de modelos disponibles y sus características. Pero antes, vamos a definir cuales son los componentes principales de una metodología de evaluación en este tipo de redes.

- **Sistema.** El sistema corresponde a la red oportunista a ser evaluada y comprende todos sus elementos, desde el hardware al software que puede afectar el rendimiento de estas redes, como puede ser el rango de transmisión, velocidad de transmisión, capacidad del búfer, sobrecarga o overhead, entre otros.
- **Carga.** La carga de trabajo representa el tipo y la cantidad de peticiones al sistema, que en las redes oportunistas son principalmente nodos móviles que cuentan con algún tipo de dispositivo para transmitir mensajes. Básicamente podemos distinguir entre dos tipos de carga:
 - **Movilidad de los nodos:** es el movimiento de los nodos y sus interacciones. Se puede decir que es el aspecto más importante en las redes oportunistas. El movimiento de los nodos esta restringido al escenario a evaluar y la complejidad de estos escenarios pueden ir desde un área restringida como un cuadrado, hasta escenarios más realistas basados en el mapa de una ciudad, por ejemplo. Este aspecto será ampliado en la sección 2.5.
 - **Trafico:** son todos los mensajes y respuestas de la red generadas por los nodos. Puede ser simple como la difusión de un único mensaje para todos los nodos de la red, hasta más complejos como patrones de mensajería basados en el uso de redes sociales o aplicaciones móviles de mensajería. En la sección 2.6 será explicado con más detalle.
- **Métricas.** Como parte final necesitamos definir las métricas para evaluar el rendimiento de las Redes Oportunistas. Estas métricas están principalmente enfocadas a la evaluación de la difusión de la información en términos de tiempo de diseminación, tasa de entrega, número de saltos, o sobrecarga de mensajes en la red. Entonces, cuando hemos hecho la evaluación del rendimiento, usualmente solemos tener una gran cantidad de datos o números que debemos de procesar y analizar para mostrar las métricas que creamos necesarias. Estas métricas serán explicadas con mayor detalle en la sección 4.2 del capítulo de las evaluaciones.

Las técnicas de evaluación dependen de las características descritas anteriormente. Básicamente podemos tener tres métodos principales:

- **Mediciones.** Pueden estar basadas en mediciones reales o realizadas en un sistema de prueba (testbed). El problema es que realizar los experimentos usando escenarios y equipos reales puede ser muy costoso y algunas veces imposible de realizar, y por lo tanto su disponibilidad es muy limitada. Sin embargo, existen evaluaciones completas que han sido descritas en [3, 78, 66]. Otros experimentos están enfocados en obtener trazas reales de la movilidad de los nodos, como el repositorio Crowdad [17] que es considerado el mejor lugar para obtener estos datos.
- **Simulación.** Es un modelo simplificado del sistema y la carga, implementado mediante software. Un enfoque muy común es la combinación de una herramienta de simulación de red, junto con una traza realista de movilidad, para reproducir el dinamismo real y la interacción de los nodos móviles. Estas simulaciones pueden ser muy costosas computacionalmente, especialmente para cargas largas o complejas, por lo que esta parametrización no debe ser tomada a la ligera.
- **Modelos Analíticos.** Son modelos matemáticos del sistema y la carga. Usando los modelos analíticos podemos evitar algunos de los inconvenientes de la simulación y de las pruebas reales, haciendo una evaluación de rendimiento más rápida y amplia. Los modelos analíticos usualmente requieren fuertes suposiciones o simplificaciones sobre el sistema a evaluar y el modelo de carga de tráfico considerado es muy simple (usualmente la difusión de un único mensaje con un patrón de contacto dado). Estos modelos son considerados modelos macroscópicos, donde podemos identificar los mecanismos claves en la difusión de la información. Existen dos clases principales de modelos analíticos propuestos para el modelado de este tipo de redes: modelos markovianos [28, 30, 35, 45, 73, 80] y modelos deterministas basados en procesos epidémicos o poblacionales (*population processes*) [30, 18, 34, 82, 84]. El principal problema con los modelos basados en cadenas de *Markov* es que si no se obtienen expresiones cerradas la resolución cuando el número de nodos es alto es inviable, por lo que no se puede usar este modelo para lugares concurridos. Los modelos analíticos requieren una descripción precisa y concisa del escenario de movilidad, que usualmente asume que los tiempos de inter-contacto entre pares de nodos es exponencialmente distribuido con una la tasa de contacto determinada [28].

En la tabla 2.1 encontramos un resumen de las principales técnicas para evaluar una red oportunista. Finalmente, en la figura 2.2 podemos ver la categorización de las tres técnicas de evaluación de acuerdo a la exactitud subjetiva y el coste. En un eje tenemos el *costo* usado como un termino amplio, comprendiendo el costo

computacional, más específicamente por simulación y modelos analíticos; y el coste económico que puede llegar a ser muy alto en experimentos reales. En el otro eje tenemos la precisión de los resultados obtenidos comparados con los reales. Los modelos analíticos son más rápidos, pero los resultados podrían ser irreales. De todas formas, la simulación puede obtener una precisión muy cerca a los bancos de pruebas reales usando simuladores complejos y trazas móviles reales, a pesar del coste computacional, aunque como veremos, las trazas reales pueden no ser del todo fiables al condicionar los resultados solamente al escenario para el que fueron creados.

2.5. Modelos de Movilidad

La evaluación de rendimiento de las soluciones con Redes Oportunistas en escenarios realistas deben considerar y combinar aspectos técnicos, como el comportamiento de los protocolos así como las características de la movilidad humana. La movilidad genera oportunidades para la comunicación. Por lo tanto, la comprensión de los patrones de movimiento humano se considera una parte esencial para evaluar el desempeño de los protocolos de enrutamiento en condiciones realistas de movilidad. La oportunidad para una comunicación se puede modelar en

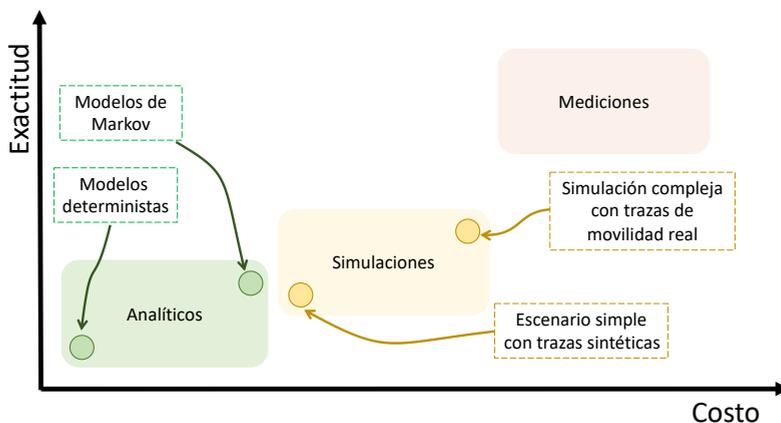


Figura 2.2: Exactitud versus Costo dependiendo de los métodos de evaluación para evaluar el rendimiento de las redes oportunistas.

un simulador considerando el contacto entre usuarios o considerando el efecto del cambio en sus posiciones.

Comúnmente, la evaluación de las Redes Oportunistas combina el uso de un simulador de redes con trazas realistas de movilidad. A pesar de que existe una amplia disponibilidad de trazas obtenidas de la observación de la movilidad de los nodos en escenarios reales, los resultados que son obtenidos son específicos de estos escenarios. En este sentido, la utilización de estas trazas, aunque útil, claramente posee algunos inconvenientes cuando se intenta extender los resultados obtenidos a otros escenarios “similares”. Adicionalmente, estas trazas tienen un conjunto fijo de nodos, y la renovación (si es que existe) es muy reducida. Con el fin de evitar estas restricciones, los modelos sintéticos de movilidad pueden ser usados con el objetivo de proporcionar una generación parametrizable de trazas, basados en la reproducción de alguna propiedad estadística de la movilidad humana. Sin embargo, estos modelos no pueden capturar el patrón de movilidad de las personas en un escenario espacial específico, ni la variación temporal de la cantidad de personas en un lugar.

En esta sección nos centraremos en explicar cómo se modela la posición de un nodo, lo que llamamos modelos de movilidad. En otras palabras, los modelos de movilidad responden a una pregunta simple pero muy importante ¿dónde está el usuario?

A continuación se hace una introducción a los modelos de movilidad más relevantes para su uso en la simulación de una red oportunista.

2.5.1. Modelos de Movilidad Aleatoria

Los modelos con movimientos aleatorios emplean patrones de movimiento estocásticos para mover un nodo dentro de un área determinada. El modelo de movilidad mas utilizado en muchas simulaciones se llama *RWP*, debido a la simplicidad de su implementación. Básicamente, su funcionamiento se basa en lo siguiente: el nodo móvil selecciona un destino aleatoriamente y se mueve hacia él con una velocidad al azar. Existen otros modelos de movilidad basados en *RWP*, como son: los modelos de movilidad con *dependencia temporal*, es decir el próximo movimiento dependerá del movimiento anterior, con *dependencia espacial*, es decir, tienden a cambiar el movimiento de manera correlacionada con la posición anterior y con *restricción geográfica*, donde el movimiento está restringido por calles u obstáculos.

En [2, 13] encontramos un análisis de los modelos de movilidad más comunes. Sin embargo, estos modelos no son útiles para ser utilizados en Redes Oportunistas, ya que estos modelos deberían de imitar el comportamiento humano, donde el movimiento de un usuario también es influenciado por sus actividades diarias (casa, escuela o trabajo), sus medios de transporte (a pie, bicicleta, autobús, etc.)

o por el comportamiento de otros usuarios en su vecindario o entorno. Muchas de estas actividades están relacionadas con el comportamiento del usuario y las relaciones sociales, además de las tres características mencionadas anteriormente. Mostraremos estas propiedades y su impacto en el rendimiento de las Redes Oportunistas también de forma experimental en la parte de resultados de esta tesis.

2.5.2. Trazas Reales de Movilidad

Existe un gran conjunto de trazas de movilidad que han sido obtenidas de la observación de los nodos y su movilidad en escenarios reales. Estas trazas proporcionan información precisa, especialmente cuando se recopila entre un gran número de participantes y durante un periodo de tiempo más prolongado. Podemos encontrar dos tipos de trazas: de contacto y de ubicación.

Una traza a partir de los contactos se obtiene midiendo el tiempo de contacto entre pares de nodos en un intervalo determinado. Existen trazas o conjuntos de datos bien conocidos, donde se ha capturado los contactos de personas o vehículos, en congresos o ciudades como: INFOCOM [40], Cambridge [50], Milán [25], MIT [20] entre otras, y sus datos estadísticos han sido estudiados en profundidad en [60, 33].

La simplicidad de las trazas basadas en contactos permite la evaluación analítica y la simulación de redes oportunistas de forma mucho más simple. Su principal inconveniente es que no permite simular el impacto de las capas de red. Por lo tanto, para evaluar estos aspectos debemos utilizar trazas basadas en la ubicación.

Las trazas de ubicación son el resultado de obtener la ubicación de los nodos, y por lo general suelen ser coordenadas GPS obtenidas de forma periódica, o bien cada vez que se mueven. Existen varios tipos de estas trazas, como por ejemplo: los taxis de Shanghai [86], o los estudiantes en el campus universitario [75], entre otros.

Finalmente, en el repositorio Crowdad [17] encontramos la mayoría de las trazas disponibles públicamente, y podría considerarse el primer lugar para encontrar el tipo de trazas requerida para simulaciones. Aunque los modelos de movilidad basados en trazas representan patrones de movimiento muy realistas, no son muy útiles cuando se trata de un nuevo entorno de red, del que aún no se han recopilado trazas. Además, no permiten reaccionar ante ningún cambio de perspectiva del usuario, por ejemplo: “ruta de evacuación” al huir del fuego. También son costosos de usar en simulaciones, porque la información sobre los siguientes puntos debe leerse desde archivos externos.

2.5.3. Modelos Híbridos de Movilidad

En esta categoría se encuentran los modelos que son una mezcla de los modelos descritos anteriormente. A estos modelos se le incluyen algunos parámetros, por ejemplo: la frecuencia de movimiento del usuario en las diferentes ubicaciones, que se derivan de una colección de trazas o de la experiencia del usuario. Por ejemplo, el modelo Small World In Motion (SWIM) [55] se basa en la suposición de que un usuario o nodo selecciona como siguiente Punto de Interés (*Point of Interest (PoI)*), a un lugar cercano a su casa o un lugar muy popular (por ejemplo un restaurante popular en la ciudad). Por lo tanto, los modelos híbridos intentan modelar las propiedades reales de los movimientos humanos teniendo en cuenta las suposiciones del “sentido común”, pero también las estadísticas de las trazas. Los modelos híbridos logran un mejor rendimiento y escalabilidad en comparación con las trazas reales de movilidad.

Existen muchos estudios disponibles que ayudan a generar modelos de movilidad más realistas basados en las relaciones sociales entre los nodos y las preferencias de ubicación, por ejemplo: usuarios, viajes periódicos en distancias cortas, movimientos coordinados por relaciones sociales, etc. Algunos de estos modelos son: Truncated Levy Walk (TLW) [65], Self-similar Least Action (SLAW) [57], SMOOTH [56], SWIM [55], HCMM [8], Work Day Movement (WDM) [21], Time Variant Community model (TVC) [38], HHW [83] y Sociological Orbit models (SOLAR) [26].

En resumen, se podría concluir que los modelos de movilidad aleatoria no son tan adecuados para simular Redes Oportunistas. Es preferible utilizar modelos híbridos sofisticados o, si no están disponibles, hacer uso de trazas reales.

2.5.4. Modelos Basados en Movilidad de Peatones

Se han diseñado muchos modelos de movilidad para tratar de reproducir el comportamiento de la movilidad humana. Desde los modelos básicos como *RW* y *Random Way Point (RWP)* [7], pasando a aquellos modelos más complejos y realistas. Existen modelos de movilidad que consideran algunos aspectos sociales del movimiento humano, como por ejemplo aquel que considera el desplazamiento que puede tener una persona durante su jornada laboral y los horarios de comida. Se ha denominado a este modelo Working Day y ha sido estudiado en [22], además de SWIM [54], SLAW [49]. Adicionalmente, para tener simulaciones y experimentos más realistas, una de las mejores opciones es utilizar trazas reales de movilidad [75, 69], junto con un simulador de redes oportunistas.

Debido a las limitaciones de las trazas en algunos artículos los autores suelen hacer uso de simuladores de peatones para evaluar la movilidad. En [77], el autor

Tabla 2.1: Resumen de las Técnicas para la Evaluación de Rendimiento de una Red Oportunista.

	Medición	Simulación	Analítico
Sistema	Mediciones al sistema real	Depende del simulador, desde simple a complejo	Es simple, con fuertes suposiciones y simplificaciones
Carga	Real o Sintética (Benchmarking)	Muy configurable: cargas simples (movilidad sintética, escenarios simples), cargas realistas (basado en mapas, movilidad en trazas)	Muy simple, basado en tasa de contactos, área simple sin consideración espacial, un único mensaje
Métricas	Medición del sistema, por lo que son restringidas al experimento	Métricas personalizadas, dependen del simulador	Valores deterministas para procesos poblacionales, y distribuciones para modelos de cadena de Markov
Pros	Método más realista	Muy flexible: control total de la carga de trabajo, modelo del escenario, métricas, etc. Diferentes niveles en los parámetros	Visión global sobre el funcionamiento del sistema. Modelos deterministas; no dependen del tamaño de la carga y son muy rápidos
Contras	Los escenarios son muy limitados, no es fácil evaluar el efecto de diferentes parámetros. Costoso, ya que hay que construir el sistema	El tiempo de cálculo depende de la carga y la complejidad del sistema, y puede ser muy alto	No se tienen en cuenta aspectos espaciales de la carga. Los resultados pueden no ser precisos. Los modelos de cadena de Markov pueden ser imprecisos con muchos nodos.

introduce un modelo complejo de movilidad de peatones para calles basado en colas, probabilidad de contactos y duración. Este modelo es comparado con los resultados de la simulación usando el simulador comercial de peatones llamado

LEGION [6]. Usando este simulador de peatones, los autores de [32] estudian el impacto de la movilidad en un escenario de comunicación oportunista, donde el tiempo de inter-contacto y la duración del contacto son factores muy importantes. Los resultados de esos experimentos muestran que, como se esperaba el tipo de escenario es el aspecto más importante a considerar, por lo que un modelo general no puede ser considerado.

Finalmente, en [59] se propone un modelo para el conteo de multitudes basado en una aplicación que recibe mensajes desde puntos de acceso (*Access Points (APs)*), además de realizar también el conteo de contacto entre nodos. Ellos proponen un modelo basado en Ecuaciones Diferenciales Estocásticas (*Stochastic Differential Equations (SDE)*), donde evalúan estas ecuaciones utilizando algunas trazas de movilidad generadas con la herramienta LEGION y otros modelos de movilidad.

2.6. Modelos de Tráfico

A la hora de simular un escenario del mundo real, uno de los principales parámetros es la cantidad de datos que se crean y circulan en la red a evaluar. También en este caso los modelos usados deben reproducir lo mejor posible las características del tráfico real. El modelo de tráfico es considerado importante en Redes Oportunistas, debido a que el tiempo de creación de un mensaje en particular es crucial en el retraso resultante en la entrega o difusión del mensaje. Por ejemplo, si el usuario crea el mensaje en casa sin estar en contacto con otros dispositivos, solo se puede entregar en los próximos días, cuando comience a moverse nuevamente, lo que introduce un alto retraso en la entrega.

Cuando se habla de modelos de tráfico, necesitamos diferenciar entre el tamaño del tráfico y la frecuencia del mismo. El tamaño modela la cantidad de datos que se crean a la vez (1KB o 1GB, u otros tamaños aleatorios), mientras que la última determina la frecuencia con la que se crean los datos (una vez por segundo, cada hora o aleatoriamente). Además, es importante tener en cuenta que existen modelos de tráfico orientados hacia el destino y sin destino. El libro de Wehrle [79] nos proporciona una visión buena y amplia de los modelos existentes.

En esta tesis consideraremos solo algunos de los modelos más relevantes para las redes oportunistas, conocidos como:

- **Tráfico Constante / Periódico:** Este es el modelo más simple, donde un paquete de datos es creado cada x intervalos de tiempo. Muchos investigadores lo consideran poco realista, pero como se muestra en [16], en simulaciones muy grandes se comporta igual de bien que otros modelos que se consideran más realistas.

- **Tráfico Uniforme:** Este modelo también está basado en un intervalo constante x , pero el paquete de datos se crea en cualquier momento de ese intervalo de tiempo, en lugar de al principio o al final de ese intervalo. El momento de creación es calculado de forma aleatoria utilizando una distribución uniforme.
- **Tráfico Poisson:** Este es probablemente el modelo más conocido, donde el instante de creación se calcula de forma aleatoria utilizando una distribución de Poisson. Esta distribución modela muy de cerca el tráfico de la red de un usuario, como la navegación web, las llamadas telefónicas, los mensajes de texto, entre otros.

2.7. Herramientas de Simulación

Los simuladores de Redes Oportunistas permiten evaluar los distintos componentes en este tipo de redes, por ejemplo utilizar nuestro propio escenario o hacer uso de trazas de movilidad, además de la utilización y evaluación de los diferentes protocolos de enrutamiento. La utilización de simuladores de movilidad ha sido propuesta en varios trabajos de investigación y con distintos fines. En [77], se ha estudiado estadísticamente la movilidad a lo largo de una calle y en [59] se ha utilizado un simulador de peatones y un simulador de red. En esta sección exploramos los simuladores usados, presentando información sobre su arquitectura, escenarios de uso y escalabilidad.

Para poder desarrollar esta tesis doctoral, hemos utilizado varios simuladores, combinando un simulador de movilidad peatonal (PedSim) junto con un simulador de redes oportunistas (ONE), lo que nos permite crear nuestros propios escenarios. En los siguientes párrafos describiremos las principales características de estos dos simuladores.

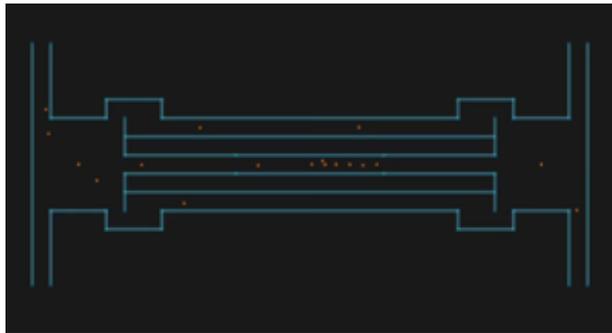
2.7.1. PedSim

PedSim[27] es un simulador microscópico de peatones de código abierto. Usando este simulador de movilidad, podemos crear nuestros propios escenarios, por ejemplo: casas, edificios, aparcamientos, así como determinadas áreas de la ciudad como: plazas, estaciones de metro o tren, entre otros. Se pueden configurar varias opciones con respecto a la movilidad de los peatones, desde el número de peatones en un área en particular, la velocidad a la que viajan, el tiempo en que un grupo de peatones ingresa o se va, etc.

Los escenarios recreados en PedSim pueden incluir paredes, obstáculos fijos y móviles, por lo que nos permite definir lugares muy realistas. Incluye dos herra-



(a) Escenario 1



(b) Escenario 2

Figura 2.3: Vista de los escenarios generados con PedSim. Las líneas azules corresponden a los obstáculos fijos, los puntos rojos corresponden a los peatones.

mientas: una biblioteca *PEDSIM C++* que le permite usar la dinámica de peatones en su propio software, y una herramienta de visualización en tiempo real, como

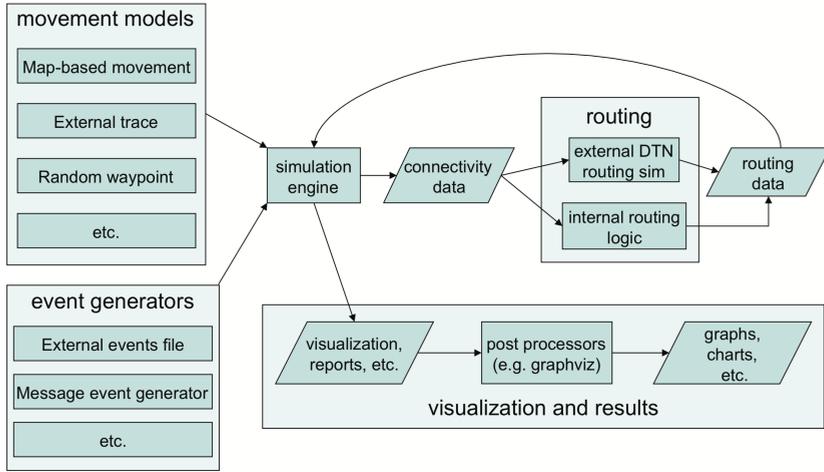


Figura 2.4: Visión general de ONE (Figura tomada de [48]).

podemos ver en la figura 2.3. Para definir el escenario debemos crear un script que defina los diferentes elementos del lugar a simular así como el comportamiento de los peatones.

Cuando se define el escenario, PedSim simula el movimiento del peatón basándose en un modelo genérico acoplado usando una ecuación diferencial, conocido como *modelo de fuerza social* (social force model), desarrollado por Dirk Helbing y Peter Molnar [31]. Este modelo de fuerza social se usa generalmente en este tipo de simuladores de peatones como Legion [6] y SUMO [5]. La simulación genera el movimiento de los peatones en las áreas que se han definido cómo permitidas, evitando obstáculos, y además podemos tener una vista previa utilizando la herramienta de visualización en tiempo real. Al final, se obtiene una traza de ubicación con el movimiento seguido por los peatones. Dicha traza luego será usada como entrada en un simulador de Redes Oportunistas, donde se puede configurar las demás opciones para el correspondiente envío de mensajes.

2.7.2. The ONE

El simulador ONE (*Opportunistic Network Environment*) [48], es una herramienta de simulación basada en eventos discretos especialmente diseñada para evaluar el rendimiento de las Redes Oportunistas. Este simulador fue creado en el año de 2009 en la Universidad Aalto de Helsinki (Finlandia), y actualmente se

mantiene en cooperación entre la Universidad de Aalto (grupo de investigación Comnet) y la Technische Universität München (grupo de investigación Connected Mobility). La versión 1.6.0 utilizada en esta tesis fue lanzada en julio del 2016, y se encuentra disponible en GitHub¹. Este simulador fue específicamente diseñado para evaluar el rendimiento de los protocolos de enrutamiento más conocidos [23, 42, 11, 68], como los vistos en la sección 2.3. ONE permite, generar el movimiento de los nodos usando los modelos de movilidad mas básicos, modelar el encaminamiento de mensajes entre los nodos con los algoritmos de enrutamiento que se encuentran ya disponibles en su código fuente, definiendo cuantos nodos y de que tipo son remitentes o receptores, visualizar la movilidad de los nodos y el paso de los mensajes, todo a través de su propia interfaz gráfica de usuario.

Además, ONE puede hacer uso de trazas de movilidad, ya sean del mundo real o de otros generadores de movilidad. Puede producir una variedad de informes, como la localización de los nodos segundo a segundo, el paso de mensajes entre nodos, y estadísticas generales. Este simulador está escrito utilizando el lenguaje de programación Java, y dado que el código fuente está disponible de forma gratuita, permite extenderlo fácilmente para implementar nuevas ideas y soluciones, y personalizar los módulos existentes.

En ONE podemos agrupar varios tipos de nodos inalámbricos de acuerdo a las características y su posible relación, es decir, si los nodos son peatones, vehículos, o fijos, pudiendo estos nodos fijos funcionar como puntos de acceso (APs). Los grupos de nodos comparten varias características comunes: modelo de movilidad, tamaño de los buffers, rango de transmisión, etc. Adicionalmente, ONE ofrece una interfaz gráfica de usuario (Graphical User Interface (GUI)), donde se puede ver de forma detallada la configuración del escenario y ejecutar simulaciones más cortas para validar la configuración; esto es bastante recomendable antes de lanzar un proceso largo de simulación. En caso de que se necesite hacer varios conjuntos de simulaciones, las cuales pueden ser grandes y con algunos parámetros diferentes, se ofrece un mecanismo llamado “indexación de ejecución”, que se puede hacer editando el mismo archivo de configuración, y se ejecuta en modo de proceso por lotes.

Respecto a los modelos de movilidad, ONE proporciona los modelos más relevantes, como: Random Walk, Random Way Point, Linear y Grid. Además, permite el uso de trazas de movilidad basadas en mapas, y trazas basadas en patrones de usuario comunes, como Work Day y Office Day. ONE cuenta con un módulo para administrar entradas de movimientos externos, por ejemplo, trazas de movilidad sintéticas generadas por otras aplicaciones, o trazas de GPS provenientes de situaciones de movilidad real, por ejemplo: peatones o automóviles. Esta entrada de

¹<https://akeranen.github.io/the-one/>

datos debe formatearse con una marca de tiempo y sus respectivas coordenadas, para generar la movilidad de los nodos en el simulador.

Finalmente, ONE también proporciona los procedimientos básicos para administrar los dispositivos, como son los búfers internos de los nodos. Además, ONE ofrece la posibilidad de realizar simulaciones con los modelos de movilidad anteriores, y con la posibilidad de generar sus propias trazas sintéticas. Es decir, podemos definir un área con un tamaño simple, con un número determinado de nodos, y posteriormente realizar los experimentos del envío de información, utilizando alguno de los principales protocolos de enrutamiento como: Epidemic [76], Spray & Wait [72], PRoPHET [53], First Contact [44], Direct Delivery [73] y MaxProp [10]. Algunas de las variantes de estos protocolos se encuentran también disponibles, como PRoPHET v2 [51], Wave Routing, MaxProp con estimación y Scheduling utilizando el algoritmo de Dijkstra para la implementación de la ruta más corta para datos programados.

2.8. Resumen

En esta sección hemos descrito varios conceptos básicos y claves de las Redes Oportunistas. Primero hacemos una definición de lo que son las Redes Oportunistas y su uso en distintos campos. Después se ha descrito de forma general lo que es la movilidad y cómo este aspecto influye en la difusión del mensaje, junto con otro aspecto muy importante como son los protocolos de encaminamiento. Se ha realizado una revisión de los protocolos más populares de acuerdo a la cantidad de copias que envían.

Se han revisado las metodologías adecuadas para la evaluación de este tipo de redes, junto con los modelos de movilidad más usados, ya sean basados en movilidad aleatoria, trazas reales o híbridos. Otro aspecto importante es el modelo de tráfico de mensajes que se ha utilizado para la generación de estos, ya que el periodo de creación de mensajes y el orden en que se envían es clave para entender los resultados. También hemos visto las dos principales herramientas utilizadas para la creación de nuestros escenarios PedSim y ONE.

Capítulo 3

Definición y Evaluación de Escenarios

3.1. Introducción

En las redes móviles actuales, la movilidad y el número de los usuarios en un escenario puede variar durante el tiempo de evaluación, y por ello es necesario disponer de escenarios o modelos que intenten reproducir lo más realmente posible el comportamiento humano. Esto nos permitirá definir una metodología válida a seguir durante la evaluación, creación y posterior validación de los escenarios.

En esta sección vamos a profundizar en el proceso que hemos seguido para poder recrear los escenarios, describiendo los diferentes tipos de escenarios enfocados a diferentes tipos de nodos y soluciones. Para poder evaluar el rendimiento de los protocolos de enrutamiento y su rendimiento en aquellos escenarios en los que el número de nodos móviles no es el mismo durante todo el tiempo de simulación, o el flujo de nodos varía durante el tiempo de simulación, hemos empleado los dos simuladores que han sido descritos en la sección 2.7.

Resumiendo, en este capítulo describimos la preparación de los escenarios para ser usados por los simuladores. Primero describiremos el proceso de generación de escenarios peatonales con PedSim y finalmente detalles de los escenarios vehiculares utilizados en esta tesis.

3. DEFINICIÓN Y EVALUACIÓN DE ESCENARIOS



Figura 3.1: Localización de los escenarios evaluados en el mapa de la ciudad de Valencia, España. A la izquierda tenemos la “Plaza de la Virgen”, un lugar muy turístico y bastante concurrido por los peatones. Las dimensiones de esta plaza son aproximadamente de 120×120 metros. A la derecha tenemos la estación de metro conocida como “Estación de Alameda”, localizada en el centro de la ciudad, tiene cuatro carriles, tres plataformas y cuatro entradas principales.

3.2. Procedimiento para la Generación de Escenarios Peatonales

El objetivo de esta sección es la de generar escenarios sintéticos realistas en los que se siga de cerca el movimiento real que realizan las personas en determinados rangos horarios. Las metodologías utilizadas actualmente para evaluar estos escenarios reales se basan en una cantidad fija de nodos y no se permite variar el número de personas en estos escenarios. La herramienta utilizada para poder crear estos escenarios es el simulador PedSim.

Para el desarrollo de los escenarios, usaremos dos lugares reales que se encuentran localizados en la ciudad de Valencia (España), como se muestra en la figura 3.1. El primero de ellos corresponde a una plaza conocida como la “Plaza de la Virgen” que es la típica plaza peatonal muy turística, localizada en el centro de la ciudad. En este escenario vamos a validar el comportamiento de los principales protocolos de encaminamiento, realizando el envío de información entre las personas que se encuentren en la plaza. El segundo lugar corresponde a una estación de metro, conocida como “Estación de Alameda”, que tiene cuatro carriles o vías y

3.2. Procedimiento para la Generación de Escenarios Peatonales

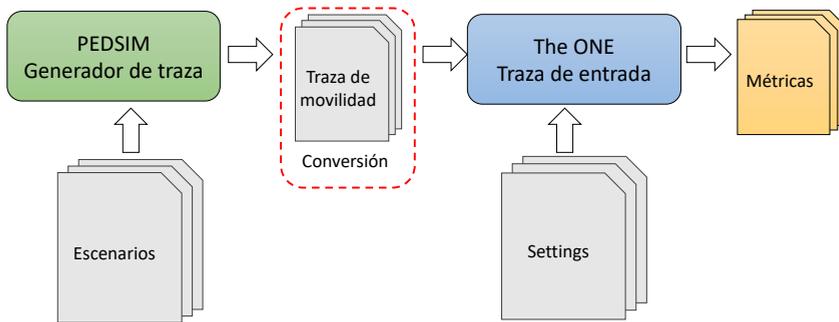


Figura 3.2: Esquema para la evaluación de la movilidad peatonal utilizando escenarios reales.

tres plataformas, localizada en medio del antiguo cauce del río Turia que actualmente es un parque. En este escenario vamos a validar la difusión de información desde los puntos de acceso que ubicaremos en los dos entradas principales. El proceso seguido para la generación de estos escenarios peatonales se detalla paso a paso a continuación (ver figura 3.2):

1. Se ha creado un archivo de texto (script) para definir cada uno de los escenarios, donde hemos incluido los principales parámetros, como la velocidad de los peatones, los puntos por donde deben pasar, los obstáculos fijos o paredes, el desplazamiento y el tiempo que dura cada movimiento. También es necesario definir en qué segundo entran o salen los peatones, si cambian de dirección o esperan durante algún tiempo determinado.
2. Estos scripts de los escenarios, son ejecutados en PedSim, donde se generará un fichero de texto para cada uno de los escenarios. Este fichero contiene principalmente los nodos y sus coordenadas en el tiempo.
3. Como tercer paso, hay que transformar la traza para que sea aceptada por el simulador ONE, ya que el formato de la traza no es compatible entre los dos simuladores. Por ejemplo, en la traza generada por PedSim, se incluyen los obstáculos y el tiempo viene dado solo una vez en cada segundo, y posteriormente vienen los identificadores de los peatones y sus posiciones. Mientras que en ONE no es necesario enumerar todos los peatones en cada movimiento. Básicamente en este paso hay que cumplir un aspecto muy importante, en ONE deben estar enumerados todos los nodos desde el inicio

3. DEFINICIÓN Y EVALUACIÓN DE ESCENARIOS

de la traza, o sino la simulación no tomará en cuenta aquellos nodos que no se encuentren definidos desde el segundo cero.

4. Una vez que tenemos la traza en el formato correcto, para que sea usada en ONE, hay que configurarla en un archivo, donde se pueden parametrizar los demás ajustes o las características necesarias para que los nodos del escenario puedan enviar la información: como el tipo de tecnologías que tienen los dispositivos móviles de los peatones (es decir el radio del alcance, si el tipo de tecnología es bluetooth o wifi), el tamaño del búfer, y dónde y qué reportes se guardarán.
5. Para terminar, se tienen que definir que métricas y que queremos utilizar o mostrar, como puede ser: el alcance de la difusión, el tiempo que ha tardado en entregarse un mensaje a un nodo (o a toda la red), la sobrecarga que puede existir en la red, el porcentaje de utilización del buffer, entre otras métricas. Dependiendo del tipo de prueba que estemos realizando, habrá que repetirla un determinado número de veces, con el fin de promediar los valores y que estos sean más fiables. En concreto, las pruebas que presentaremos en los siguientes capítulos han sido realizadas diez veces.

A continuación se describen los dos escenarios generados.

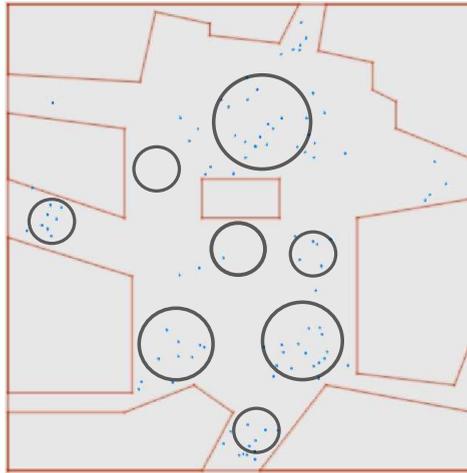
3.2.1. Escenarios de la Plaza

El primer escenario que tenemos es una plaza real localizada en la ciudad de Valencia, España. Este lugar es conocido como “*Plaza de la Virgen*”, situada a la izquierda de la figura 3.1. Para acortar nos referiremos a este escenario simplemente como “*Plaza*”. Es el típico lugar turístico que generalmente tiene un alto grado de renovación de personas. El área seleccionada tiene una dimensión de 120×120 metros. Desde el escenario físico real definimos en PedSim un área con obstáculos y espacios abiertos donde los peatones pueden entrar o salir como se muestra en la figura 3.3b. Basándonos en este lugar hemos definido cuatro escenarios, todos ellos de una hora de duración y con el mismo número de peatones (100) dentro de la plaza. Los diferentes escenarios difieren en la tasa de renovación de los peatones, desde la “no renovación” hasta la “alta renovación”, como sigue:

1. **No Renovación:** En este escenario, los 100 peatones permanecen dentro del área durante todo el tiempo de simulación. Este escenario ha sido creado para evaluar el comportamiento de los protocolos de difusión cuando no existe renovación de personas, de modo que podamos comparar los resultados con los siguientes escenarios.



(a) Vista real de la plaza



(b) Escenario en PedSim

Figura 3.3: *Plaza de la Virgen*, Valencia, España. Es una plaza peatonal muy turística, con aproximadamente 120×120 metros. El espacio transitable esta rodeado de edificios, con una fuente en el centro y siete accesos. En (b) vemos varios peatones, además de los puntos de interés delimitados con círculos.

3. DEFINICIÓN Y EVALUACIÓN DE ESCENARIOS

2. **Baja Renovación:** En este escenario se reemplazan 50 peatones cada 15 minutos, es decir, 50 peatones abandonan el área evaluada y en su lugar ingresan 50 nuevos peatones, por lo que el número final de peatones que han pasado por la plaza será de 250.
3. **Media Renovación:** La tasa de renovación es incrementada a 50 peatones nuevos cada 5 minutos, por lo que al final el número total de personas que han pasado por la plaza es de 650 peatones.
4. **Alta Renovación:** Esta sería una situación extrema, donde cada minuto se renuevan 50 peatones. Al final de la simulación, un total de 3050 peatones diferentes han visitado la plaza.

En la tabla 3.1, podemos encontrar resumidos los principales parámetros, donde N_0 es el número inicial de peatones, A_T es el tiempo promedio entre renovaciones representado en segundos, P_R es el número de personas que entran o salen en cada renovación, y N el número de peatones generados.

Tabla 3.1: Principales parámetros de los escenarios de la *Plaza*.

Escenario	N_0	A_T	P_R	N
No Renovación	100	-	0	100
Baja Renovación	100	900	50	250
Media Renovación	100	300	50	650
Alta Renovación	100	60	50	3050

La renovación y el movimiento de los peatones fueron implementados en PedSim de la siguiente manera: el escenario de la Plaza tiene siete puntos de entrada y salida, y los peatones son colocados al azar en cualquiera de las entradas. El movimiento de los peatones dentro de la plaza sigue el modelo de fuerza social, desarrollado por Dirk Helbing y Peter Molnar [31]. A estos nodos se les asigna aleatoriamente una velocidad de desplazamiento entre el rango de 0.3 - 1.5 m/s, moviéndose entre los principales puntos de interés, delimitados por los círculos como se muestra en la figura 3.3b. Estos puntos de interés son definidos como las localizaciones hacia donde los peatones van y se quedan durante un tiempo, y que en este caso representan a monumentos, restaurantes y terrazas de la plaza. Respecto a la renovación de los peatones, en cada intervalo de renovación un número dado de nodos son aleatoriamente seleccionados entre los peatones que están dentro de la plaza. Estos nodos son notificados para dejar la plaza usando una de las salidas existentes, y entonces se crean 50 nodos nuevos y puestos aleatoriamente en una de las entradas de la plaza, y realizan su movimiento a través del escenario.

Cuando tenemos generadas las cuatro trazas de movilidad, son modificadas para que sean utilizadas con el simulador ONE, como se ha explicado en la sección 3.2. Adicionalmente, para probar la difusión de la información con estos escenarios, se colocarán dos nodos fijos en dos puntos contrarios de la plaza cercanos a los puntos de interés. Este proceso será explicado con mas detalle en el capítulo 5.

3.2.2. Escenarios de la Estación

El segundo escenario peatonal elegido para nuestras evaluaciones es una estación de metro. Elegimos este sitio al representar un típico ejemplo de lugar muy concurrido, donde existen diferentes grados de renovación y flujos de personas. Para poder realizar este escenario, se tomaron mediciones de una estación real. Durante el desarrollo de esta tesis nos referiremos a ella simplemente como la “Estación”. En la figura 3.1 la encontramos a la derecha de la imagen. Esta denominada “*Estación de Alameda*” se encuentra localizada en la ciudad de Valencia, España. Esta estación tiene cuatro pistas y tres plataformas, que son dos plataformas laterales y una plataforma central. Comprende un área de aproximadamente 150×50 metros. Las plataformas son accesibles por las escaleras a las que se puede llegar por las cuatro puertas de entrada situadas cada una de ellas en cada esquina de la estación, como se puede ver en la figura 3.4b. Por esta estación pasan cuatro líneas de metro, con un intervalo promedio entre 5 y 10 minutos (los horarios habituales pueden ser consultados en [1]).

Para generar el escenario en PedSim, primero hemos tomado mediciones reales mediante la observación in-situ de las personas que llegan o dejan la estación en diferentes horarios del día. Particularmente, los valores corresponden a las mediciones tomadas los días del 3 al 7 de diciembre del 2017. Seleccionamos tres diferentes rangos horarios de una hora, y para cada uno de esos rangos hemos medido el tiempo de llegada de los trenes, el número de personas que entran o salen de esos trenes, además de las personas que llegan desde las cuatro puertas de entrada. Una vez que tenemos estos datos se han promediado. Ordenando los tres rangos horarios por tasa de renovación, tenemos:

1. **Bajo (19 - 20h)**. Este intervalo, obtenido desde las 19:00 a las 20:00 horas, es el intervalo cuando más personas llegan a la estación para volver a casa, y es el escenario menos concurrido.
2. **Medio (14 - 15h)**. El segundo intervalo de 14:00 a 15:00 horas, esta caracterizado por un grado de renovación medio.

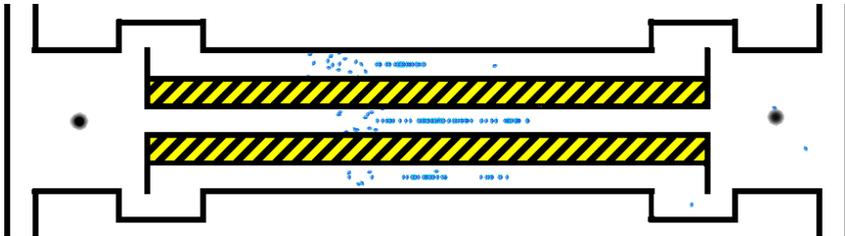
3. DEFINICIÓN Y EVALUACIÓN DE ESCENARIOS

3. **Alto (08 - 09h)**. Finalmente, este intervalo de 08:00 a 09:00 horas, corresponde a la hora pico, siendo el escenario más concurrido, con la tasa de renovación más alta.

Para caracterizar los tres diferentes intervalos de tiempo, hemos definido varias



(a) Vista real de la estación



(b) Escenario de la estación generado con PedSim. Podemos ver en el escenario varios peatones entrando y saliendo del lugar (puntos azules). Los dos grandes puntos negros son los nodos fijos.

Figura 3.4: *Estación de Alameda*, en Valencia, España. Las dimensiones del lugar son al rededor de 150×50 metros. En la figura (b) los puntos azules representan a los peatones.

3.2. Procedimiento para la Generación de Escenarios Peatonales

métricas: la tasa promedio de llegada β_D y de salida δ_D de la estación usando las puertas de entrada, el tiempo promedio entre trenes A_T , y el número promedio de personas que llegan P_A y se van P_L en cada tren. Todos estos valores están reflejados para el rango de tiempo evaluado. A partir de estos valores, podemos obtener el número actual de personas que han ingresado o dejado la estación por las puertas de entrada ($N_I = \beta_D \cdot 3600$ y $N_O = \delta_D \cdot 3600$), así como el número de personas que han estado en la estación: $N = N_I + N_O$. Los principales parámetros de estos escenarios se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Principales parámetros de los escenarios de la *Estación*. Los valores de β_D y δ_D están en personas/segundo, y A_T en segundos.

Escenario	β_D	δ_D	A_T	P_L	P_A	N_I	N_O
Bajo (19-20h)	0.09	0.04	132	5.14	11.43	320	144
Medio (14-15h)	0.11	0.07	124	9.23	14.28	400	263
Alto (08-09h)	0.17	0.10	127	12.85	21.79	610	360

Si comparamos los datos de los dos escenarios, es decir de la Estación y la Plaza, el número de peatones dentro de la estación es diferente en cada periodo. La generación y movimiento de los peatones fueron implementados en PedSim tomando en cuenta los valores anteriores y los siguientes aspectos:

1. *Personas entrando en la Estación.* Las personas entran a la estación a través de las puertas de las entradas principales, se dirigen a las plataformas, donde se quedan para esperar el tren. Específicamente, por cada una de las cuatro entradas, se generan nuevos peatones de acuerdo al proceso *Poisson* con tasa $\beta_D/4$. Los peatones entran a la estación y pasan por los torniquetes ubicados en los dos extremos de la estación. Entonces cada peatón es aleatoriamente dirigido con igual probabilidad a una de las cuatro plataformas.
2. *Llegada de los trenes.* Los tiempos de llegada del tren son generados con valores obtenidos de las mediciones. Cuando un tren llega, los peatones esperan en la plataforma correspondiente, suben al tren y *desaparecen* de la simulación, saliendo del escenario en el tren. Al mismo tiempo, los peatones bajan del tren y entran en la plataforma. Desde esta plataforma, y para cada peatón, se selecciona aleatoriamente una puerta de salida de la estación. Entonces los peatones van directamente a la puerta seleccionada y dejan la estación.

Como en los escenarios de la Plaza, el movimiento de los peatones sigue el modelo de fuerza social con una velocidad promedio en el rango de 0.3 - 1.5 m/s.

Finalmente, para cada intervalo, se generan las trazas de movilidad, que al final deberán ser adaptadas al formato aceptado por el simulador ONE.

3.3. Evaluación de la Movilidad en los Escenarios Generados

En vista de que el rendimiento de las Redes Oportunistas está basado en la oportunidad de contactos, es importante caracterizar la estructura de estos contactos, y en general, la movilidad de los nodos. Entonces, analizaremos las trazas generadas considerando los aspectos temporales y espaciales. Para ello es necesario simular las contactos que se generan con estas trazas utilizando el simulador ONE. También se van a añadir dos nodos fijos que serán necesarios para nuestras pruebas de difusión de mensajes.

El escenario *Plaza* como se ha comentado en las secciones anteriores cuenta con siete entradas y salidas. Ahora con respecto al segundo escenario recreado, la *Estación*, se puede ver en la figura 3.4b que tiene dos nodos fijos ubicados uno en cada extremo de la estación, donde los dos puntos negros representan a los torniquetes por donde las personas tienen que pasar, ya que como se prevé es el lugar mas conveniente para realizar la difusión de información. De esta manera, los nodos cercanos pueden recibir directamente la información actualizada, y en caso de que la difusión sea con el protocolo *Epidemic*, se propagará esta información al resto de nodos que se encuentren en el lugar siguiendo un enfoque epidémico.

Resumiendo, los nodos fijos están localizados en las posiciones con más alta posibilidad de contactar con los nodos móviles. Estos nodos fijos son el origen del mensaje de información. En esta parte solo se evalúa el realismo de los escenarios generados.

3.3.1. Evolución Temporal de los Nodos

En esta subsección, vamos a modelar y caracterizar el número de nodos en los diferentes escenarios. Primero, consideramos los escenarios de la *Plaza* usando los principales parámetros detallados en la tabla 3.1.

Se puede obtener el número acumulado de personas N_A que han llegado a la plaza, considerando un número inicial de peatones N_0 , el número de personas que se renuevan en cada periodo P_R , y el tiempo de renovación A_T , por lo que tenemos:

$$N_A(t) = N_0 + P_R \lfloor t/A_T \rfloor \quad (3.1)$$

y el número acumulado de personas que han salido de la plaza como:

$$N_E(t) = P_R \lfloor t/A_T \rfloor \quad (3.2)$$

3.3. Evaluación de la Movilidad en los Escenarios Generados

Hay que tener en cuenta que, por usar la función *parte entera* ($\lfloor \cdot \rfloor$), consideramos que la renovación tiene lugar al final del intervalo. Resumiendo, el número de personas que permanecen en la plaza en el tiempo t es $N_I(t) = N_A(t) - N_E(t)$, y como es de esperar es N_0 , y el número total de nodos después de t segundos es $N(t) = N_E(t) + N_I(t) = N_E(t) + N_0$.

Ahora evaluamos los escenarios de la *Estación*, donde podemos hacer las siguientes simplificaciones para modelar la llegada y salida de los peatones:

- Tasa de llegada a la estación: las personas entran a la estación por las puertas de acceso siguiendo una distribución de Poisson con tasa β_D (en cada puerta tenemos $\beta_D/4$).
- Llegada del tren: En este caso, las personas llegan cuando el tren llega a la estación y salen del tren (que es un proceso de ráfaga). Consideramos un número promedio de personas saliendo de cada tren (llegando a la estación) P_A , y que el intervalo de tiempo entre trenes consecutivos es A_T .
- Salida de los trenes: las personas que están en las plataformas dejan la estación subiendo al tren, que es P_L personas cada intervalo de tiempo A_T .
- Tasa de salida de la estación: las personas que bajan del tren dejan la estación por una de las puertas de acceso, después de τ segundos, que el promedio de tiempo de salida de una persona.

A partir de estos valores, podemos obtener el número acumulado de personas que han llegado a la estación, también considerando un número inicial de personas N_0 , como:

$$N_A(t) = N_0 + \beta_D t + P_A \lfloor t/A_T \rfloor \quad (3.3)$$

y el número acumulado de personas que han salido de la estación, como:

$$N_E(t) = P_A \lfloor (t + \tau)/A_T \rfloor + P_L \lfloor t/A_T \rfloor \quad (3.4)$$

Resumiendo, el número de personas que permanece en la estación en un tiempo t es $N_A(t) - N_E(t)$:

$$N(t) = N_0 + \beta_D t + (P_A - P_L) \lfloor t/A_T \rfloor - P_A \lfloor (t - \tau)^+ / A_T \rfloor \quad (3.5)$$

Tenga en cuenta que, en estas ecuaciones, consideramos que los trenes llegan al final del intervalo A_T . Por lo tanto, para el tiempo 0, asumimos que un tren acaba de pasar, y entonces algunas personas que están inicialmente en la estación saldrán en el tiempo τ ; esto es, el término $(t - \tau)^+$ cuando $t - \tau$ es negativo, será 0.

Tabla 3.3: Parámetros fijos de simulación de los escenarios *Peatonales*.

Parámetro	Valor
Movimiento	Subarea Sintética
Area	Definida con PedSim
Velocidad de los Peatones (m/s)	0.3 - 1.5
Interface	Bluetooth
Tx Rango radio (m)	8
Tx Velocidad (Mbps)	2
Memoria de Dispositivo	1 GB
Tiempo de Simulación (seg.)	3600

Usando la ecuación 3.5, podemos obtener el número promedio de nodos que están en la estación hasta el tiempo T como:

$$\bar{N}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T N(t) dt \quad (3.6)$$

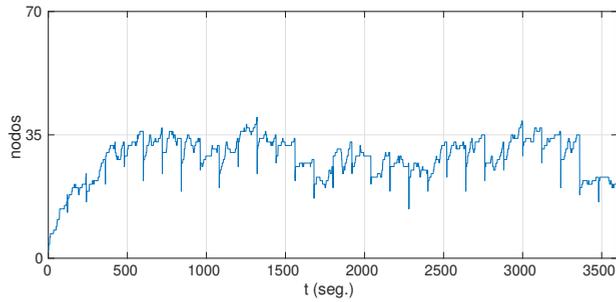
Usando la expresión, con $\tau = 180s$, y los valores de la tabla 3.2, el número promedio de nodos para los diferentes escenarios son los siguientes: Bajo (19-20h): 17.7; Medio (14-15h): 29.1, y Alta (08-09h): 40.9.

Finalmente, la figura 3.5 muestra el número de nodos dependiendo del tiempo para los diferentes rangos de tiempo, obtenido desde las trazas de movilidad. Podemos ver la variación del número de nodos dependiendo de la llegada de los trenes. El patrón es irregular, dependiendo principalmente de los valores medidos de las personas que llegan o se van en el tren. Con estos valores, también hemos calculado el número promedio de nodos para los escenarios obteniendo los siguientes valores: Bajo(19-20h): 28.5; Medio (14-15h): 36.5, y Alto (08-09h): 46.1. La diferencia de estos valores con los obtenidos con el modelo analítico anterior refleja el efecto de las variaciones de las mediciones reales, donde el modelo analítico trabaja únicamente con los valores medios.

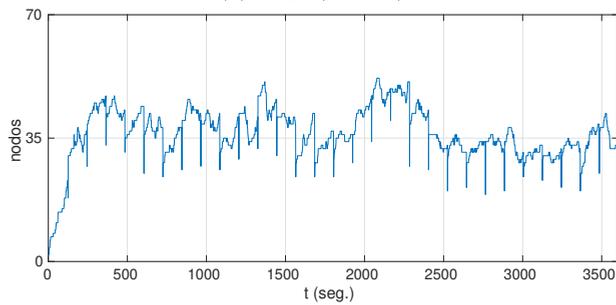
3.3.2. Caracterización de los Contactos

En esta parte nos centraremos en evaluar la caracterización de los contactos. Estos contactos fueron obtenidos usando el simulador ONE, considerando una granularidad de 1 segundo. Esto significa que dependiendo de la posición de los nodos, el simulador determina cada segundo que pares de nodos están dentro del rango de distancia para poder establecer contacto entre ellos o no, lo que

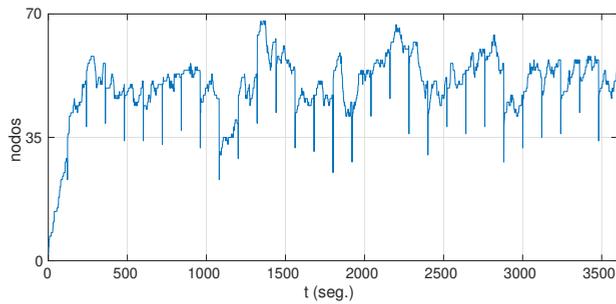
3.3. Evaluación de la Movilidad en los Escenarios Generados



(a) Bajo (19-20h)



(b) Medio (14-15h)



(c) Alto (08-09h)

Figura 3.5: Número de nodos a lo largo del tiempo para los Escenarios de la Estación.

nos permite obtener el número total de contactos y su duración, además de su ubicación.

Los mensajes son transmitidos usando Bluetooth, con un rango máximo defi-

3. DEFINICIÓN Y EVALUACIÓN DE ESCENARIOS

nido a 8 metros, y un ancho de banda promedio de 2Mbps. La tabla 3.3 resume los parámetros de simulación, incluidos los parámetros fijos que comprenden tanto el escenario definido, la velocidad de los nodos, el tiempo de simulación, y los parámetros de OppNets, como los parámetros de comunicación y el tamaño del búfer o la memoria del dispositivo.

En las tablas 3.4 y 3.5 podemos observar el número de contactos y su duración promedio de los diferentes escenarios de renovación. De estas tablas podemos ver que para los escenarios de la *Plaza*, el número de contactos permanece constante, ya que el número de nodos en el area también permanece constante (100 peatones dentro de la plaza); sin embargo, cuando la tasa de renovación incrementa, los contactos tienen menos duración; esto refleja, como se esperaba, la alta movilidad de los nodos. Al contrario, para los escenarios de la *Estación* durante las horas pico (08 - 09h y 14 - 15h), podemos ver que el número de contactos es mayor pero con una duración menor. Comparando ambos escenarios, el promedio de la duración de los contactos para el escenario de la estación es mayor, ya que algunos peatones deben esperar al tren.

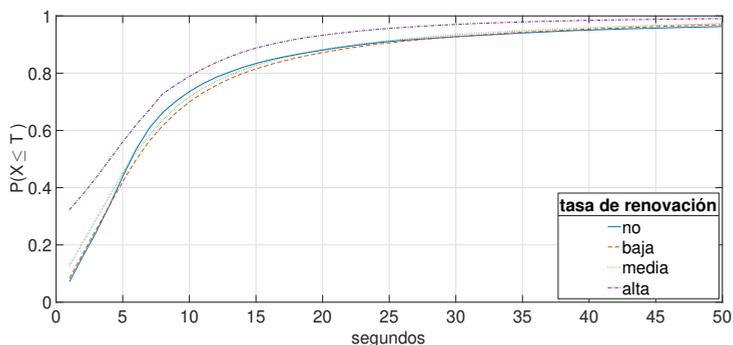
También hemos obtenido la función acumulativa de distribución (CDF) de la duración de contactos $P(X \leq T)$, como se muestra en la figura 3.6. Para los escenarios de la *Plaza*, podemos ver que cerca del 80 % de todos los contactos tienen una duración menor de 10 segundos para todas las tasas de renovación, excluyendo el escenario con alta renovación, donde la duración de los contactos es menor.

Tabla 3.4: Número de contactos y el promedio de su duración para las diferentes tasas de renovación en los escenarios de la *Plaza*.

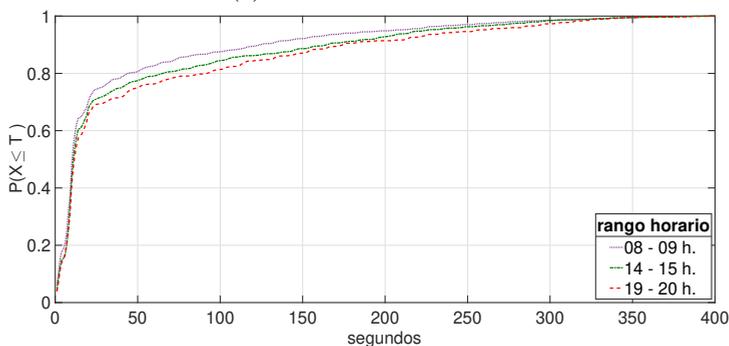
Escenario	Número de Contactos	Duración Promedio (seg.)
No Renovación	69363	12.07
Baja Renovación	66809	10.83
Media Renovación	71596	9.81
Alta Renovación	97165	6.33

Tabla 3.5: Número de contactos y el promedio de su duración para los tres rangos horarios en los escenarios de la *Estación*.

Escenario	Número de contactos	Duración Promedio (seg.)
Bajo (19-20h)	2912	53.76
Medio (14-15h)	5618	46.50
Alto (08-09h)	11002	39.72



(a) Escenarios de la Plaza



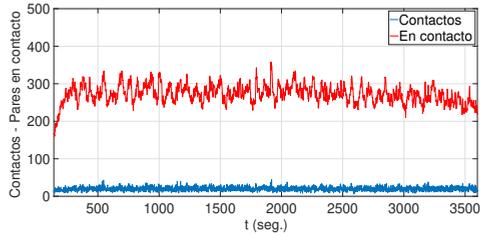
(b) Escenarios de la Estación

Figura 3.6: Cumulative Distribution Function (CDF) de la duración de los contactos en los escenarios *Peatonales*.

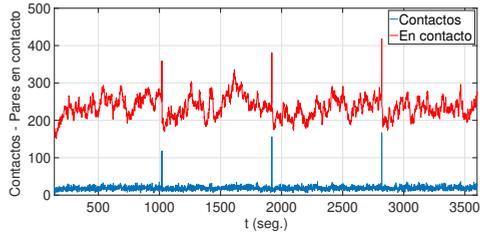
Sin embargo, podemos ver una dicotomía en la duración del contacto para los escenarios de la estación, ya que casi el 70% de los contactos tiene una duración menor que 20 segundos, existiendo una significativa proporción de contactos entre los 20 y los 300 segundos. Esto claramente refleja los dos tipos de contactos que existen en la estación: los contactos de corta duración entre las personas moviéndose dentro de la estación, y los contactos de larga duración para las personas que están esperando en las plataformas. Estos patrones de duración, como veremos en el capítulo 4, tienen un enorme impacto en la probabilidad de entrega.

Considerando la distribución temporal de contactos, las figuras 3.7 y 3.8 muestran el número de contactos empezados en un tiempo dado, y el número de pares

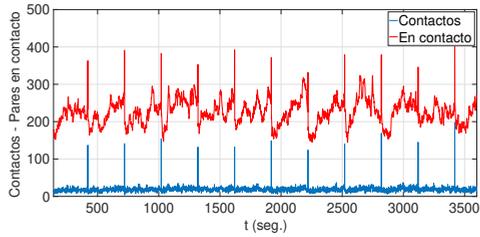
3. DEFINICIÓN Y EVALUACIÓN DE ESCENARIOS



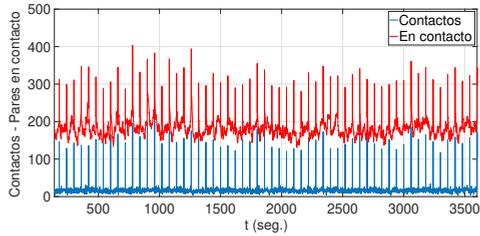
(a) No Renovación



(b) Baja Renovación



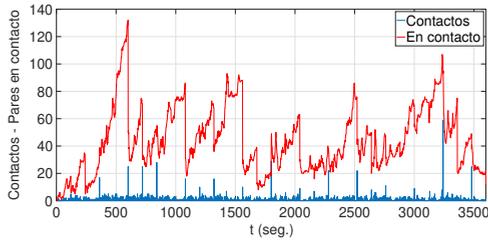
(c) Media Renovación



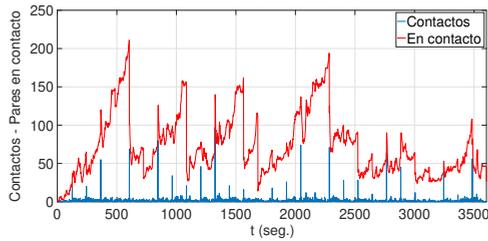
(d) Alta Renovación

Figura 3.7: Número de contactos y pares de nodos en contacto en los escenarios de la *Plaza*.

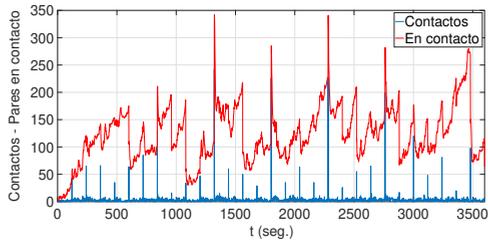
3.3. Evaluación de la Movilidad en los Escenarios Generados



(a) Bajo (19-20h)



(b) Medio (14-15h)



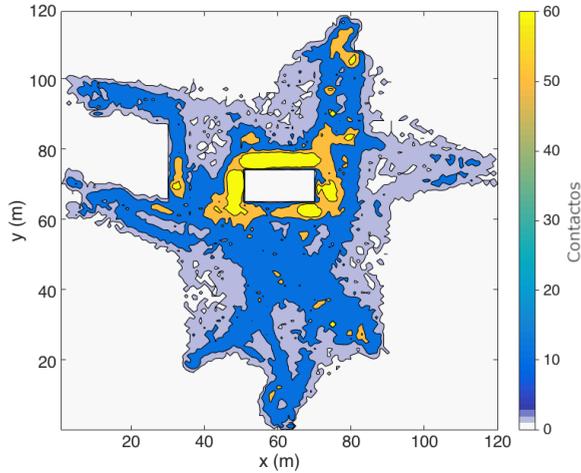
(c) Alto (08-09h)

Figura 3.8: Número de contactos y pares de nodos en contacto en los escenarios de la *Estación*.

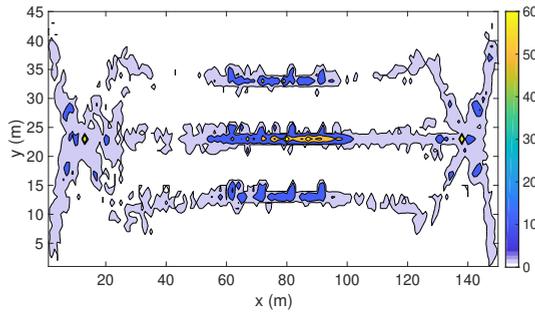
de nodos que están en contacto. Podemos ver que, cuando se produce la renovación de nodos en los diferentes escenarios, esta renovación genera una gran variabilidad en el número de contactos.

Respecto a la distribución espacial de los contactos, se obtuvieron mapas de calor (ver figura 3.9), que representan el número acumulado de pares de contactos por m^2 . Podemos distinguir la trayectoria de los peatones, donde el número de contactos son bajos y de corta duración, y el alto número de contactos están concentrados en los puntos de interés de la plaza o las plataformas de la estación,

3. DEFINICIÓN Y EVALUACIÓN DE ESCENARIOS



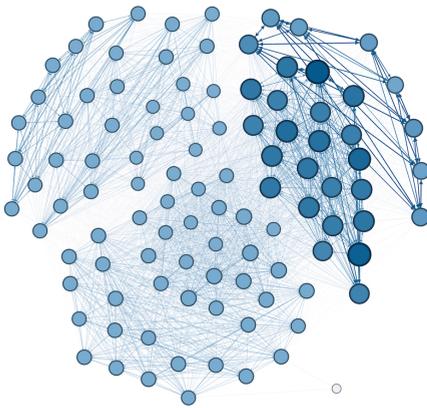
(a) Escenario de la Plaza - media renovación



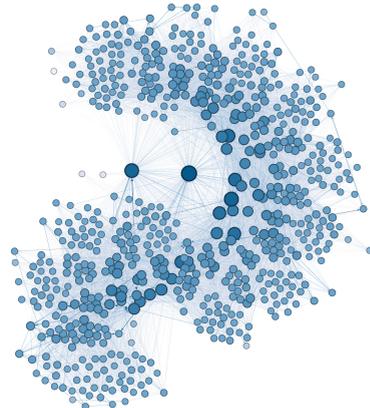
(b) Escenario de la Estación - media (14-15h)

Figura 3.9: Mapas de calor de los diferentes escenarios representando el acumulado del número de contactos por m^2 . El número de contactos se ha truncado a 60, ya que hay algunas ubicaciones, como los nodos emisores, con más de 300 contactos. Desde este mapa podemos ver que la mayoría de los contactos se producen principalmente en los puntos de interés, en las plataformas de la estación y cerca de los nodos emisores. El rectángulo blanco en el centro del escenario de la plaza corresponde a una fuente (no hay contactos posibles).

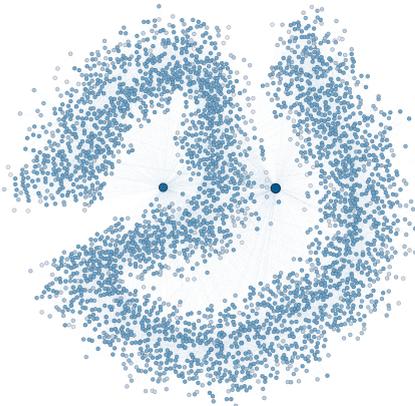
3.3. Evaluación de la Movilidad en los Escenarios Generados



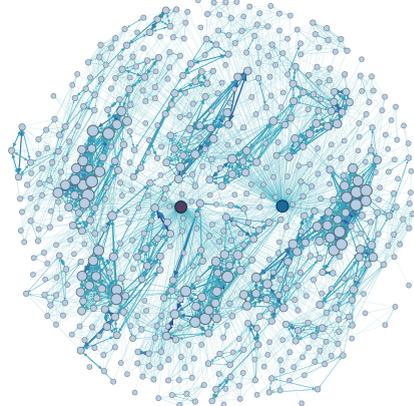
(a) Escenario de la Plaza - No Renovación



(b) Escenario de la Plaza - Media Renovación



(c) Escenario de la Plaza - Alta Renovación



(d) Escenario de la Estación - Media (14-15h)

Figura 3.10: Grafos de los contactos para cuatro diferentes escenarios. Cada línea representa un contacto entre dos nodos, es decir, cuando dos nodos están dentro del rango para una posible transmisión. El grosor de los bordes es proporcional a su duración de contacto, y el tamaño y la oscuridad de los nodos son proporcionales a su número de contactos, en teoría de grafos, el *grado de nodo ponderado*.

donde los peatones se quedan y esperan mientras observan los monumentos o la llegada del tren, mostrando también que estos contactos tienen una larga duración.

Finalmente, para identificar las comunidades y las inter-relaciones entre los nodos, obtuvimos el grafo de contactos para cuatro diferentes escenarios, como se muestra en la figura 3.10. Estos grafos fueron generados usando la herramienta *Gephi* [4], y los nodos fueron distribuidos de acuerdo al algoritmo FruchtermanReingold [24]. Para el escenario de la plaza sin renovación que se muestra en 3.10a, no podemos identificar comunidades, ya que todos los nodos permanecen en la Plaza y tienen contactos entre ellos. Entonces, la distribución de contactos, y el grado de los nodos o el número de contactos es muy uniforme. Sin embargo, para el escenario con media renovación (figura 3.10b), podemos identificar comunidades de unos cincuenta nodos, que corresponden al número de nodos renovados cada cinco minutos. Adicionalmente, los miembros de estas comunidades están también conectados a los miembros de las comunidades cercanas, reflejando la renovación de la mitad de los nodos en la plaza. También podemos identificar los nodos fijos que se encargarán de difundir la información. Los podemos identificar cómo los dos círculos centrales más oscuros, que tienen una conexión con los nodos en todos los grupos. Cuando la renovación se incrementa, en la figura 3.10c podemos identificar un patrón similar, en el que los nodos están conectados principalmente a sus vecinos. Por último, para el escenario de la estación en la figura 3.10d, los grafos de contactos son todos muy similares. Podemos identificar muchas comunidades, que corresponden a las personas que esperan en las plataformas en los diferentes intervalos de tiempo. Además, debido a estos minutos de espera, los nodos de esas comunidades tienen más contactos, que se ve reflejado en que son nodos más grandes, y con duraciones más largas ya que los bordes entre ellos son más gruesos. Los nodos fijos están claramente identificados como los nodos más oscuros en el centro del grafo.

En conclusión, las trazas generadas reflejan características temporales y espaciales realistas que son imposibles de obtener utilizando los modelos de movilidad sintéticos actuales. Veremos que estos aspectos tendrán un fuerte impacto en la difusión de la información.

3.4. Escenarios Vehiculares

Además de las trazas peatonales generadas, se han utilizado trazas vehiculares reales con el objetivo de probar los algoritmos de difusión en escenarios de movilidad muy distintos. La evaluación del rendimiento de una solución de *Red Oportunista Vehicular* debería también considerar y combinar ambos aspectos técnicos relacionados con el comportamiento de los protocolos de encaminamiento y

las características de la movilidad de los vehículos, que están relacionadas con el comportamiento humano e incluso las características propias de la ciudad donde se han tomado las mediciones.

Nosotros hemos usado trazas de dos ciudades muy diferentes, las cuales tienen modelos muy diferentes de movilidad vehicular. La primera traza corresponde a la ciudad de Roma [9]. Esta traza tiene 316 taxis en total, y los movimientos han sido capturados durante un periodo de 30 días en un área de 40km x 40km. La segunda traza corresponde a la ciudad de San Francisco [62], en la cual hay 536 taxis moviéndose durante un periodo de 24 días en una área de aproximadamente 100km x 100km. Las Figuras 3.11 y 3.12 muestran el mapa del área de ambas ciudades con la traza de movimiento de los vehículos.

En las pruebas a realizar, en lugar de evaluar toda la traza, hemos considerado tres rangos horarios del mismo día, con el objetivo de evaluar el impacto que tienen el número de vehículos en la difusión de mensajes. Estos rangos horarios están detallados en la tabla 3.6, indicando el número de vehículos activos, donde solo se consideran los vehículos que están en movimiento en estos rangos horarios. Finalmente, estas trazas, están principalmente en formato GPS, por lo que ha sido necesario procesarla y convertirla a coordenadas cartesianas, para que puedan ser usadas en el simulador de Redes Oportunistas.

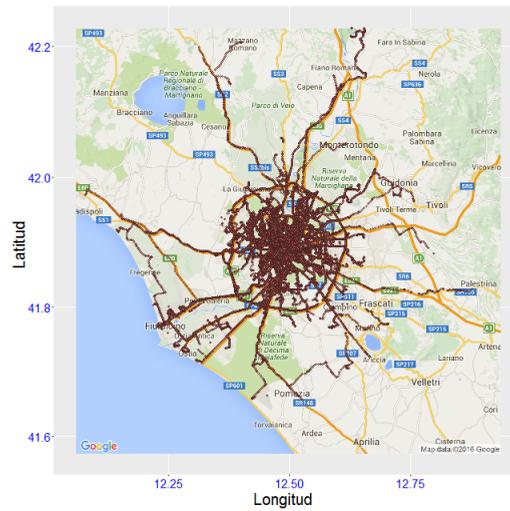
Antes de hacer la evaluación de rendimiento sobre el proceso de envío de información sobre esta trazas, evaluamos la duración de los contactos, procesamos las trazas de tráfico anteriores para obtener los contactos y sus duraciones. Desde estos valores, obtuvimos la función acumulativa de distribución (CDF) de la duración de contactos, que es $P(X \leq T)$, como se muestra en la figura 3.13.

En general, podemos ver que la gran mayoría de los contactos en estas trazas tienen corta duración. Los resultados de Roma no muestran ninguna diferencia significativa entre los tres rangos horarios. Por el contrario, los resultados de la ciudad de San Francisco muestran diferencias entre la distribución de contactos

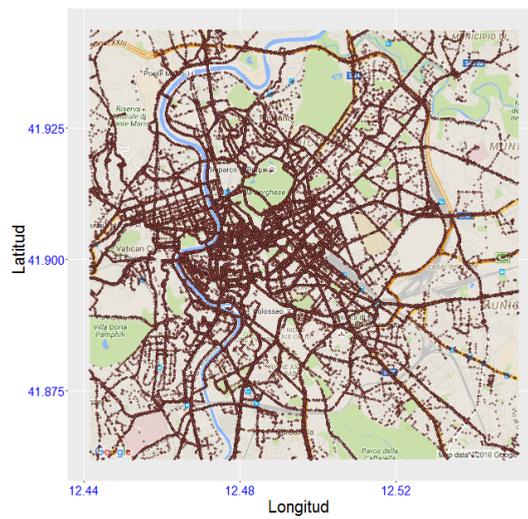
Tabla 3.6: Rangos horarios y vehículos activos.

Ciudad	Día	Rango horario	Nodos activos
Roma	1 Feb 2014	06 a 08 h.	85
Roma	1 Feb 2014	12 a 14 h.	138
Roma	1 Feb 2014	18 a 20 h.	118
San Francisco	17 May 2008	06 a 08 h.	425
San Francisco	17 May 2008	12 a 14 h.	462
San Francisco	17 May 2008	18 a 20 h.	466

3. DEFINICIÓN Y EVALUACIÓN DE ESCENARIOS

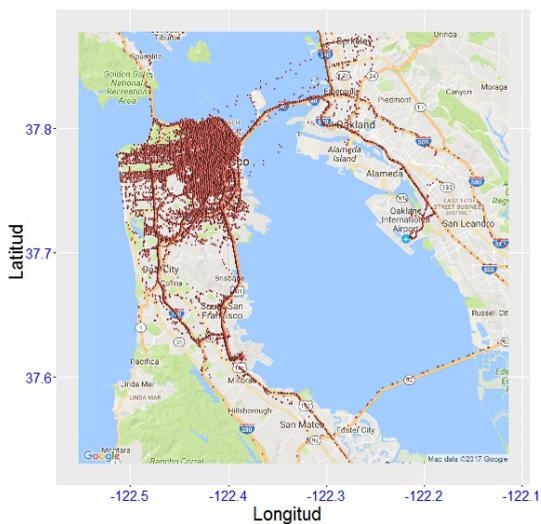


(a) Area metropolitana de Roma



(b) Centro de la ciudad de Roma (Zoom 13)

Figura 3.11: Traza vehicular de Roma (taxis).



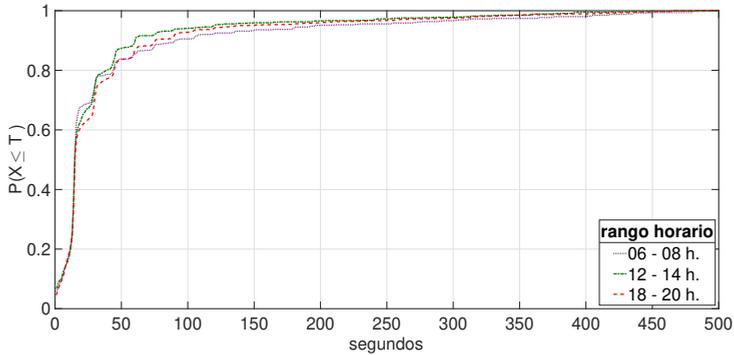
(a) Area metropolitana de San Francisco



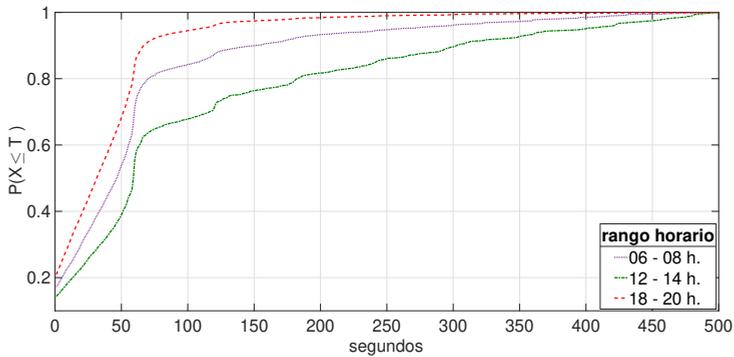
(b) Centro de la ciudad de San Francisco (Zoom 13)

Figura 3.12: Traza vehicular de San Francisco (taxis).

3. DEFINICIÓN Y EVALUACIÓN DE ESCENARIOS



(a) Ciudad de Roma



(b) Ciudad de San Francisco

Figura 3.13: CDF de la duración de los contactos en los diferentes rangos horarios.

para los rangos de tiempo evaluados. Además, la duración de los contactos son más largas que en la traza de Roma, teniendo San Francisco una proporción significativa de contactos de larga duración. La principal razón para este comportamiento es que los taxis de San Francisco usualmente regresan al estacionamiento de su compañía de transporte, donde estos contactos de larga duración tienen lugar.

3.5. Conclusiones

Como hemos visto durante todo este capítulo, uno de los aspectos más importantes a la hora de validar una red oportunista es el tipo de escenario, ya que

muchos aspectos espaciales y temporales no pueden ser derivados de un escenario a otro.

Los escenarios que hemos seleccionado para esta tesis, corresponden a escenarios abiertos, en los que las personas pueden entrar o salir del lugar, donde existen diferentes grados de renovación de personas, o en el grado de afluencia en los escenarios cambia durante las horas del día, un aspecto que también hemos destacado en los escenarios vehiculares.

Adicionalmente, dado que el enfoque para la creación de los escenarios de esta tesis es totalmente nuevo, hemos validado varios aspectos de los escenarios creados. Estos aspectos validados corresponden a la evolución temporal y espacial de los nodos, lo cual ratifica el enfoque de esta tesis doctoral.

Capítulo 4

Evaluación de la Transmisión de Mensajes en Escenarios con Renovación de Personas

4.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es evaluar el rendimiento de los protocolos de encaminamiento en escenarios peatonales con diferentes grados de renovación de personas. Antes de empezar a ver la configuración y los resultados de las evaluaciones, es importante definir primero las métricas en las que vamos reflejar el rendimiento de los protocolos para la transmisión de mensajes sobre estos escenarios. Después analizaremos los resultados de la transmisión y diseminación de la información sobre los escenarios peatonales.

4.2. Métricas del Rendimiento

Las métricas del rendimiento proveen las medidas para evaluar el rendimiento de un sistema dado. El tipo de métrica a usar en la evaluación de un sistema puede diferir de un sistema a otro. Debido a la naturaleza de las Redes Oportunistas, normalmente ciertas métricas para la evaluación de estas redes tienen menos importancia que otras, como por ejemplo la capacidad de procesamiento

(throughput). En los siguientes párrafos encontraremos una lista de las métricas más usadas con una breve descripción¹:

- **Delivery Ratio:** La *relación de entrega* es la métrica que mide cuantos paquetes o mensajes han sido entregados a su destinatario antes de que el paquete fuera retirado de la red. La razón principal para que un paquete sea eliminado de la red es cuando el paquete caduca, es decir supera el tiempo de vida del mensaje (*Time To Live (TTL)*). También existen otras razones, como la eliminación de éste del búfer de los nodos, debido al espacio limitado o las políticas adoptadas para el búfer.
- **Delivery Delay:** El *retardo de entrega* es una medida del tiempo en el que un mensaje es entregado al nodo o nodos destino. Está métrica puede considerar el alcance por nodos o por toda la red. Por ejemplo, en caso de mensajes de emergencia, es crucial conocer la velocidad de la propagación de estos datos, mientras que en otros escenarios, es importante conocer cuán rápido el dato es propagado a cada usuario dependiendo de las diferentes densidades de los nodos, patrones de movilidad, preferencias de usuario, entre otros.
- **Overhead:** Esta métrica muestra la *sobrecarga* que puede existir en la red, dependiendo de los algoritmos o protocolos usados. El overhead puede ser clasificado en varios tipos, de la siguiente manera:
 - *Overhead de datos irrelevantes o duplicados por nodo.* En las redes oportunistas, los nodos también pueden recibir datos irrelevantes o copias duplicadas. Por lo tanto, el porcentaje de datos irrelevantes recibidos o enviados y el número de copias duplicadas recibidas con respecto al número total de datos recibidos o enviados, nos da una idea de la sobrecarga por nodo o por red.
 - *Overhead del uso del búfer.* Muestra la utilización del búfer local con respecto al espacio de memoria total disponible por nodo. Esto puede analizarse más a fondo con respecto a los tipos de datos que se propagan. Por ejemplo, después de recibir los datos, aunque el nodo no este interesado en ellos, es posible que tenga que almacenar y transportar los datos hasta que encuentre otros nodos que podrían estar interesados en esos datos. Esto también causará una sobrecarga en el uso del búfer con datos irrelevantes, dependiendo de las preferencias del nodo.

¹NOTA AL LECTOR: Se ha preferido usar a lo largo del texto y en las gráficas asociadas estos términos en inglés, para evitar una posible confusión o malinterpretación de los mismos

- *Overhead de consumo de energía.* El uso del búfer para datos irrelevantes terminará causando también una sobrecarga en el consumo de energía, ya que podrían existir reenvíos innecesarios de datos irrelevantes.

En resumen, la métrica de rendimiento más significativa en las Redes Oportunistas es el *delivery ratio* (relación de entrega). Esta métrica se obtiene como el número de mensajes correctamente entregados divididos para el número total de mensajes generados. También es importante determinar cuan rápido son entregados los mensajes, por lo que también obtuvimos el *delivery delay* (retardo de entrega). Finalmente, para evaluar el *overhead* (sobrecarga) de los diferentes protocolos, se obtuvieron dos valores: el número de *mensajes creados* (messages started), que comprende todos los mensajes empezados a transmitir, y el número de *mensajes reenviados* (messages relayed), que son todos los mensajes transmitidos satisfactoriamente. Hay que tener en cuenta que si todos los mensajes son transmitidos con éxito, el número de mensajes creados y reenviados tienen el mismo valor, pero cuando la duración del contacto es baja y el tamaño del mensaje es grande, muchos de estos mensajes no se podrán transmitir con éxito ya que no tienen suficiente tiempo de contacto. Entonces, el número de mensajes reenviados será menor que el de mensajes empezados a transmitir.

4.3. Evaluación con los Escenarios de la Plaza

El objetivo de esta sección es evaluar el rendimiento de los protocolos de encaminamiento cuando los peatones usen Redes Oportunistas para el envío de mensajes entre ellos. Esto es un típico caso, donde decidimos compartir localmente información o imágenes, por ejemplo información turística entre tus amigos.

Para ello empezamos con el escenario de la Plaza descrito en la sección 3.2.1. Como el tamaño de los mensajes es importante para evaluar el rendimiento, hemos considerado tres tamaños: un mensaje corto de texto de 1KB, una foto en baja (o media) resolución de 1MB y un video corto o una foto en alta calidad de 10MB.

En detalle, se ha simulado la transmisión de mensajes entre pares de nodos que están en el escenario. Los mensajes son generados cada minuto, con remitente y destinatario seleccionados al azar. Dado que la simulación tarda una hora, el número total de mensajes generados será de 60. Los mensajes son transmitidos usando tecnología Bluetooth, con un rango de alcance de 8 metros y un ancho de banda promedio de 2Mbps. Resumiendo, los parámetros fijos de la simulación se muestran en la tabla 4.1. En esta tabla se incluyen también los parámetros fijos que comprenden tanto el escenario ya definido en PedSim, el área, tipo de

movimiento y el tiempo de simulación, así como los parámetros de comunicación y la memoria de los dispositivos.

En las evaluación que hemos realizado, utilizamos cuatro protocolos de enrutamiento: Epidemic, PRoPHET, PRoPHET-v2, Spray & Wait, y MaxProp, descritos en la sección 2.3. En la tabla 4.2 podemos ver los parámetros de configuración adicionales requeridos en algunos de estos protocolos. Con respecto a los protocolos de inundación, también hemos experimentado con diferentes valores. Específicamente, con el protocolo Epidemic hemos limitado la inundación reduciendo el TTL de los mensajes. Como veremos en la siguiente sección, la reducción de este tiempo de vida mejorará el rendimiento del enrutamiento Epidémico en los escenarios donde exista alta renovación. También podemos controlar la difusión en el protocolo Spray & Wait, por lo que hemos evaluado este algoritmo con dos cantidades de copias diferentes: 100 y 200 copias.

Para cada uno de los escenario evaluados la simulación fue repetida 10 veces, para obtener los valores promedios de las métricas descritas en la sección 4.2.

4.3.1. Evaluación de Rendimiento

El objetivo de esta parte es evaluar el rendimiento de los protocolos de encaminamiento sobre los escenarios de la *Plaza* descritos en el capítulo anterior. Antes de esta evaluación, como el número y la duración de los contactos tienen un gran impacto en estos protocolos, es importante recordar estos valores, que se encuentran en la tabla 3.4, que ha sido descrita en la sección 3.3.2. Estos datos

Tabla 4.1: Parámetros fijos de simulación para los escenarios de la *Plaza*.

Parámetro	Valor
Movimiento	Subárea Sintética
Area Rectangular (m ²)	14400
Peatones	100
Velocidad de Peatones (m/s)	0.3 - 1.5
Interface	Bluetooth
Tx Rango radio (m)	8
Tx Velocidad (Mbps)	2
Tamaño de Mensajes	1 KB, 1MB, 10MB
Memoria de Dispositivo	1 GB
TTL (min)	720 (default)
Tiempo de Simulación (seg.)	3600

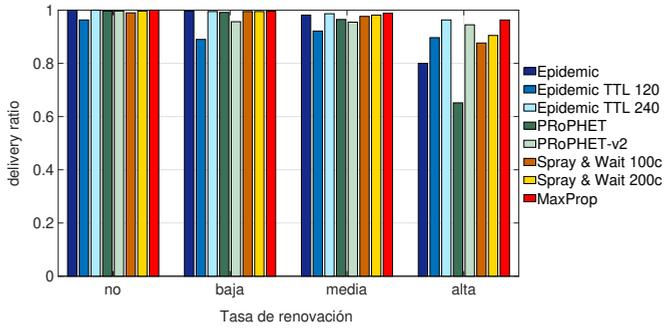
fueron obtenidos usando el simulador ONE considerando una granularidad de 1 segundo. Como podemos ver, el número de contactos incrementa a medida que incrementa la tasa de renovación, mientras que la duración de estos contactos se reduce. Es decir, en los escenarios con tasas de alta renovación hay más contactos pero con menos duración, reflejando como se esperaba, una alta movilidad. Como veremos, esto tiene un gran impacto en la probabilidad de entrega. Esto también se refleja en el CDF de la duración de contactos de la figura 3.6a (sección 3.3), donde podemos observar que prácticamente el 90 % de todos los contactos tienen una duración menor a 20 segundos.

Ahora, procedemos a estudiar el rendimiento de los protocolos de enrutamiento. En la figura 4.1 se muestra el delivery ratio para los diferentes tamaños de mensajes y tasas de renovación. Vamos a empezar evaluando los resultados para los mensajes de 1KB, que se muestra en la figura 4.1a. Podemos ver que para todos los protocolos el delivery ratio es casi 1 en los escenarios sin o con baja renovación. La principal razón es que los nodos se quedan en el lugar el tiempo suficiente para entregar el mensaje a los receptores. Incrementando la tasa de renovación (media y alta), tiene un impacto evidente en el rendimiento de algunos protocolos, como Epidemic y PRoPHET, ya que algunos nodos dejan el lugar antes de que el men-

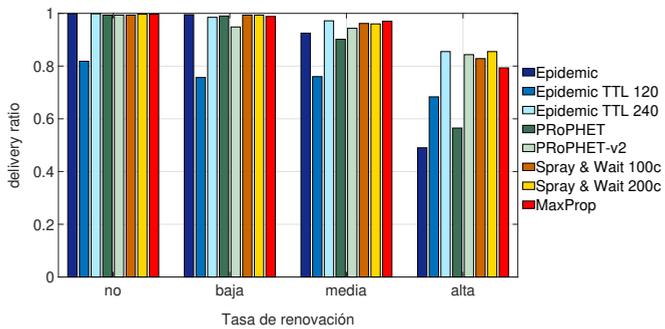
Tabla 4.2: Protocolos evaluados y sus parámetros de configuración para los escenarios de la *Plaza*.

Protocolo	Valores
Epidemic	TTL por defecto
Epidemic TTL 120	TTL de 120 seg.
Epidemic TTL 240	TTL de 240 seg.
PRoPHET	Delivery Predictability = 0.75 Transitivity Constant = 0.25 GAMMA = 0.98 Time unit = 30 seconds
PRoPHET-v2	Delivery Predictability = 0.5 Transitivity Constant = 0.9 GAMMA = 0.9 Time unit = 30 seconds Interconnection = 1800 seconds
Spray & Wait 100	Copias fijadas en 100
Spray & Wait 200	Copias fijadas en 200
MaxProp	Default configuration

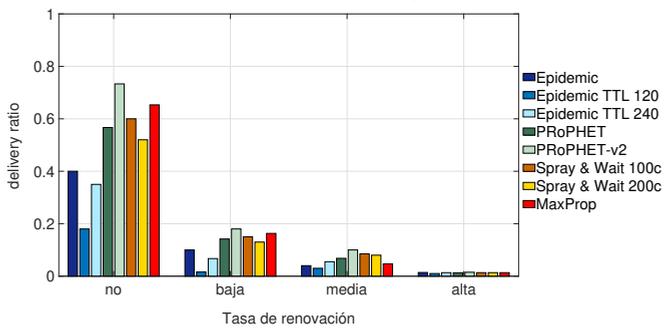
4. EVALUACIÓN EN ESCENARIOS CON RENOVACIÓN DE PERSONAS



(a) Tamaño de mensaje 1KB



(b) Tamaño de mensaje 1MB



(c) Tamaño de mensaje 10MB

Figura 4.1: Delivery ratio para los protocolos de difusión de mensajes en los escenarios de la *Plaza* con diferentes tasas de renovación.

saje pueda ser entregado a otros nodos. Esto es especialmente perceptible para los protocolos basados en Epidemic y PRoPHET.

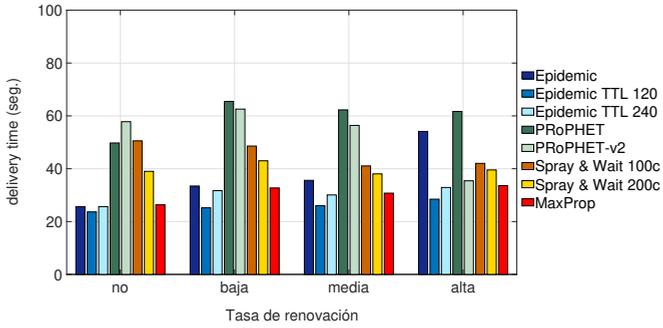
Incrementando el tamaño de mensaje a 1MB se evidencia un impacto mayor en algunos protocolos, como se muestra en la figura 4.1b. Particularmente, el delivery ratio para el protocolo Epidemic se reduce a 0.5 para el escenario con alta renovación. Esto es debido a la estrategia de inundación de este protocolo, que intenta hacer una copia de todos los mensajes posibles en todos los nodos, es decir, cuando un nuevo nodo entra en el lugar y contacta a un nodo, este intenta recibir todos los mensajes posibles hasta que finalice el contacto. Esto es, con los mensajes de 1MB, como tarda aproximadamente $1\text{MB} \cdot 8/2\text{Mbps} = 5\text{s}$ para transmitir 1 mensaje, cuando los nodos tienen muchos mensajes, algunos de estos no pueden ser transmitidos, por lo que la entrega se ve reducida. Este efecto puede ser evitado reduciendo el *TTL* del mensaje, con lo que los mensajes mas antiguos son eliminados. Podemos ver que efectivamente, para los protocolos Epidemic con *TTL* de 120 y 240 segundos la probabilidad de entrega es incrementada².

Por otro lado, los resultados para tamaño de mensajes de 10MB muestran que el delivery ratio se reduce dramáticamente. A pesar de que los resultados para el escenario sin renovación es aproximadamente de 0.5, para los otros escenarios la entrega es muy baja. La principal razón es el tiempo de transmisión del mensaje, que con este tamaño de mensaje ahora es aproximadamente $10\text{MB} \cdot 8/2\text{Mbps} = 50\text{s}$. Tomando en cuenta que el 99.08% de los contactos tienen una duración de menos de 50 segundos, como se puede ver en la figura 3.6a (sección 3.3.2), esto implica que muy pocos mensajes son transmitidos satisfactoriamente. Esto puede ser visto también en la figura 4.3c, donde el número de mensajes creados es muy alto, comparado con los que se han retransmitido satisfactoriamente. Entonces, la difusión es muy baja, por lo que en escenarios con tasas de renovación mas altas los mensajes no alcanzan su destino. Con respecto a los protocolos, en general el rendimiento de los protocolos epidémicos es menor que los demás.

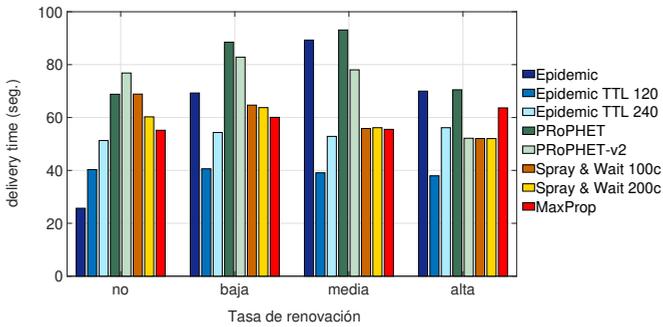
Ahora evaluamos el delivery time como se puede ver la figura 4.2. Es importante recalcar que estos valores han sido calculados solamente con los mensajes que han sido entregados. Podemos ver que para tamaños de mensajes de 1KB y 1MB en todos los protocolos el delivery time esta siempre sobre los 100 segundos, aunque aumenta ligeramente para 1MB. Parece que no hay impacto de la tasa de renovación, ya que el delivery time es muy similar en todos los escenarios. Por otro lado, para mensajes con tamaño de 10MB, el delivery time incrementa notablemente, particularmente para el escenario de no renovación, donde alcanza

²Hemos probado con valores de *TTL* mas altos para los mensajes, y los resultados fueron muy similares a Epidemic sin limites con un significativo incremento en el overhead. Este comportamiento es muy similar al protocolo Spray & Wait, donde el número de copias están limitadas.

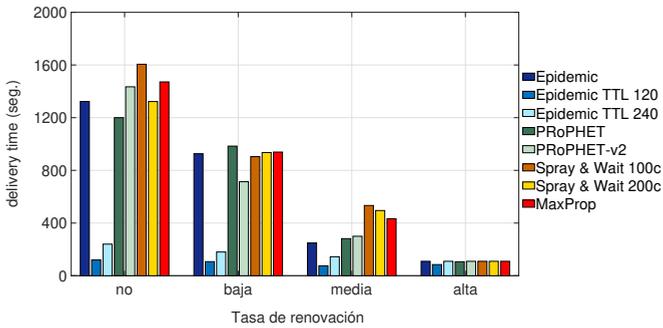
4. EVALUACIÓN EN ESCENARIOS CON RENOVACIÓN DE PERSONAS



(a) Tamaño de mensaje 1KB



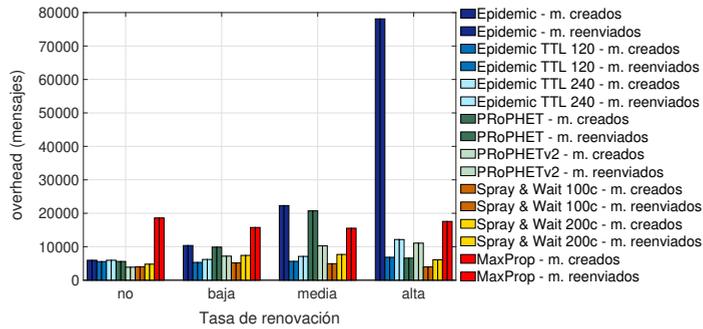
(b) Tamaño de mensaje 1MB



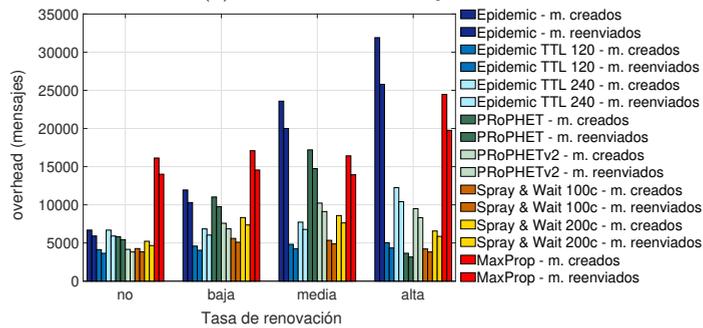
(c) Tamaño de mensaje 10MB

Figura 4.2: Delivery time para los protocolos de difusión de mensajes en los escenarios de la Plaza con diferentes tasas de renovación.

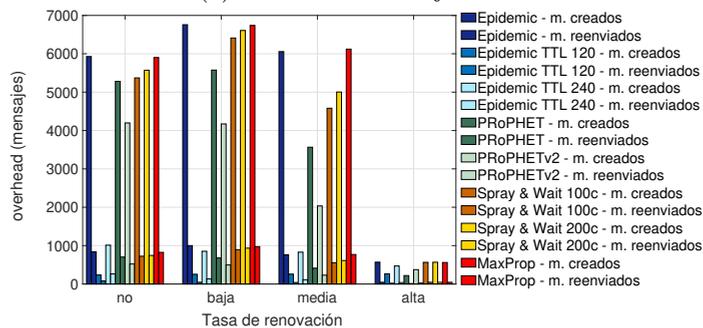
4.3. Evaluación con los Escenarios de la Plaza



(a) Tamaño de mensaje 1KB



(b) Tamaño de mensaje 1MB



(c) Tamaño de mensaje 10MB

Figura 4.3: Overhead, mensajes creados y reenviados para los protocolos de difusión de mensajes en los escenarios de la Plaza con diferentes tasas de renovación.

valores cercanos a los 1400 segundos. Primero, podemos ver claramente que para Epidemic con TTL reducido, el delivery time esta cercano al limite definido (120 y 240s). Para los otros protocolos podemos ver que este tiempo se reduce en escenarios con alta movilidad. Particularmente, podemos ver que en el escenario con alta renovación el delivery time está sobre los 120 segundos, que es dos veces el periodo de renovación. Esto tiene sentido, ya que 120 segundos es el tiempo promedio que los nodos se quedan dentro del lugar en este escenario. Finalmente, comparando los resultados de los diferentes protocolos, los valores más bajos son obtenidos por Epidemic TTL 120 y 240.

Finalmente, evaluamos los resultados de la sobrecarga que se muestran en la figura 4.3. En estos gráficos, cada protocolo tiene dos barras que corresponden a los mensajes creados y los mensajes reenviados, que como hemos dicho anteriormente son los mensajes empezados a transmitir (y que no necesariamente tienen que terminar su transmisión satisfactoriamente) y los mensajes transmitidos satisfactoriamente. Podemos ver que para los mensajes de 1KB todos los mensajes han sido transmitidos ya que ambos valores son iguales, pero cuando el tamaño del mensaje incrementa a 1MB, algunos de estos mensajes no son reenviados, y para los mensajes de 10MB, la mayoría de mensajes no son reenviados. Esto puede ser visto como la peor de las situaciones en las Redes Oportunistas, ya que la mayoría de las oportunidades para transmitir el mensaje son desperdiciadas.

Comparando los resultados para los diferentes protocolos, podemos ver que la mayor sobrecarga, como se esperaba, es para el protocolo Epidemic, que se incrementa cuando la tasa de renovación es mayor. MaxProp también tiene una gran *sobrecarga*, penalizando los buenos resultados de la entrega. El mejor resultado se obtiene, precisamente, en aquellos protocolos que controlan la inundación de mensajes, como Spray & Wait, y Epidemic con TTL reducido.

En conclusión, excluyendo a Epidemic y PRoPHET, el delivery ratio de los protocolos de enrutamiento es muy similar en todos los escenarios. Sin embargo, tomando en consideración otros aspectos como el delivery time, los algoritmos de inundación controlada como Spray & Wait obtienen buenos resultados con una sobrecarga baja.

Respecto al impacto del tamaño de mensaje, específicamente para los casos cuando el número de mensajes que no son reenviados es muy grande (en el caso de los experimentos con mensajes de 10MB), una buena opción puede ser el uso de un protocolo activo, como el protocolo Friendly Sharing [37], con el objetivo de forzar a terminar las transmisiones.

Tabla 4.3: Parametros fijos de simulación para los escenarios de la *Estación*.

Parametros	Valor
Movimiento	Subarea Sintética
Area (m2)	150m x 50m
Velocidad de los Peatones (m/s)	0.3 - 1.5
Interface	Bluetooth
Tx Rango radio (m)	8
Tx Velocidad (Mbps)	2
Tamaño del Mensaje	1KB to 6MB
Memoria del Dispositivo	1GB
TTL (minutos)	720 (default)
Tiempo de Simulación (seg.)	3600

4.4. Evaluación con los Escenarios de la *Estación*

En esta sección se describen los resultados de la evaluación de los escenarios de la estación descritos en la sección 3.2.2³. Los experimentos realizados son muy parecidos a los descritos en la sección anterior para la Plaza. Pero a diferencia de los experimentos de la plaza, en los que se evalúan la transmisión nodo a nodo, en este caso hemos evaluado la difusión de la información. El tipo de información puede ser, por ejemplo, horarios de metro, anuncios, fotos, videos, o cualquier otro tipo de información que la compañía de metro requiera transmitir a los peatones que hacen uso de las instalaciones. Esta información es inicialmente generada desde los nodos fijos que se han situado a los lados de los torniquetes en las entradas, al ser considerado el lugar mas conveniente, ya que todas las personas tienen que pasar junto a los torniquetes. De esta manera, los peatones que pasen cerca pueden recibir directamente esta actualización de la información, y en el caso de la difusión con el protocolo Epidemic, difundir esta información al resto de peatones en la estación siguiendo este enfoque epidémico.

Los parámetros de la simulación son equivalentes a los de la plaza, y podemos encontrarlos en la tabla 4.3.

³Nota: En este capítulo nos hemos centrado en evaluar los resultados para un solo tramo horario (14-15h). En el siguiente capítulo se incluye, junto a la evaluación del protocolo EpidemicX2, los resultados para otros tramos horarios.

4. EVALUACIÓN EN ESCENARIOS CON RENOVACIÓN DE PERSONAS

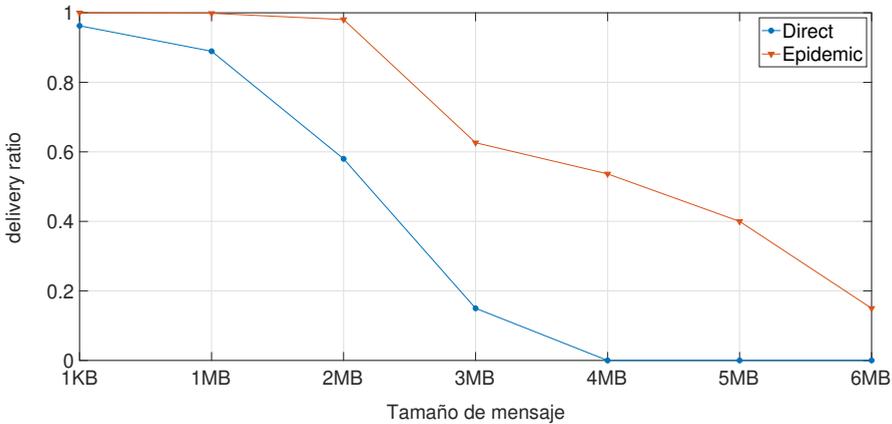


Figura 4.4: Delivery ratio dependiendo del tamaño del mensaje para el escenario de la *Estación* con media afluencia (14-15h).

4.4.1. Evaluación de Rendimiento

En esta subsección, haremos una evaluación de la difusión de información. Se ha comparado la difusión directa de la información con *direct delivery*, y la difusión epidémica para diferentes tamaños de mensaje. La métrica de rendimiento mas importante es el *delivery ratio*, que es la proporción de nodos que han recibido la información, como se muestra en la figura 4.4. Hemos obtenido este ratio para los diferentes tamaños de mensajes usando los protocolos Direct Delivery y Epidemic. Podemos ver que para tamaños de mensajes pequeños (1KB) el delivery ratio es casi 1 para ambos protocolos. La principal razón es que el tiempo de transmisión es pequeño, por lo que el mensaje puede ser transferido incluso cuando el tiempo de contacto es muy corto. Incrementando el tamaño de mensaje es evidente el impacto en el rendimiento de los protocolos, especialmente evidente con *Direct Delivery*, ya que la duración del contacto con los nodos fijos algunas veces no es lo suficientemente largo para transmitir el mensaje completamente, por lo que muchos nodos no reciben el mensaje. El protocolo Epidémico mejora esta entrega transmitiendo estos mensajes grandes en los espacios donde la duración de contacto es mayor, es decir en las plataformas, mientras los usuarios esperan la llegada del metro.

Los resultados con tamaño de mensaje de 6MB muestran que el delivery ratio se reduce dramáticamente. La principal razón es que el tiempo de transmisión de los mensajes es aproximadamente $6\text{MB} \cdot 8/2\text{Mbps} = 30\text{s}$, con lo que los nodos fijos

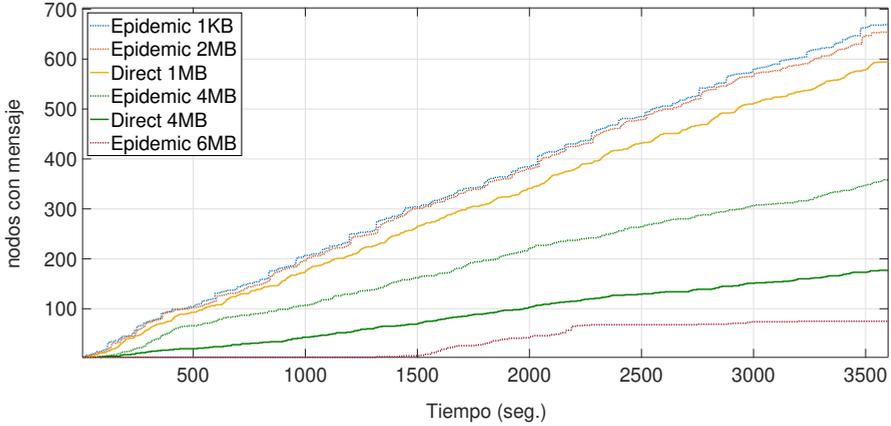


Figura 4.5: Número de nodos con copia del mensaje en el escenario de la Estación con media afluencia (14-15h).

no tienen suficiente tiempo para transmitir estos mensajes a los nodos que pasen cerca de los puntos de información. Esto se confirma en la evolución del número de nodos con mensaje: en la figura 4.5 podemos ver que un único mensaje de 6MB es entregado en el segundo 1500 de nuestra evaluación, lo que da inicio a la difusión del mensaje durante un pequeño intervalo de tiempo.

En la figura 4.5, podemos ver el comportamiento de la entrega de mensajes desde los torniquetes de entrada (utilizando direct delivery). Los mensajes más difundidos son aquellos que tienen menor tamaño. Podemos apreciar como los mensajes con tamaño más grande son especialmente los que tienen menos difusión, en el caso del tamaño de 6MB con el protocolo de difusión epidémico empieza a difundirse a partir del segundo 1500, ya que la velocidad promedio de desplazamiento de los peatones es de 0.3 a 1.5 metros por segundo, lo que nos podría indicar por ejemplo que algún peatón ha pasado lo suficientemente despacio cerca de los torniquetes para recibir por primera vez un mensaje de este tamaño, y difundirlo a los otros peatones en las zonas donde los contactos son más largos, es decir en los andenes de la estación.

La figura 4.6 muestra los resultados obtenidos evaluando el delivery time, que es el tiempo promedio que las personas tienen que esperar para obtener la información cuando entran a la estación. Podemos ver que, como se esperaba, cuando el tamaño de mensaje incrementa, el delivery time también incrementa. Es importante resaltar que la principal razón para un promedio alto en el delivery time con el protocolo epidémico comparado con direct delivery, es debido a que se permite

4. EVALUACIÓN EN ESCENARIOS CON RENOVACIÓN DE PERSONAS

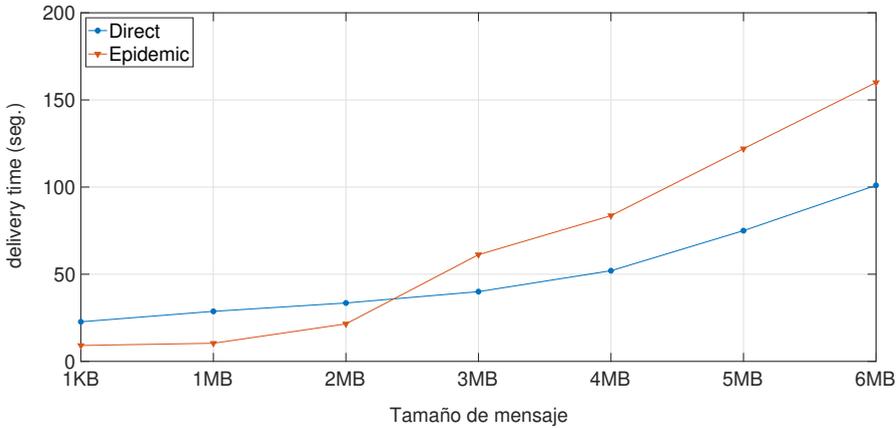


Figura 4.6: Delivery time dependiendo del tamaño de mensaje para el escenario de la *Estación* con media afluencia (14-15h).

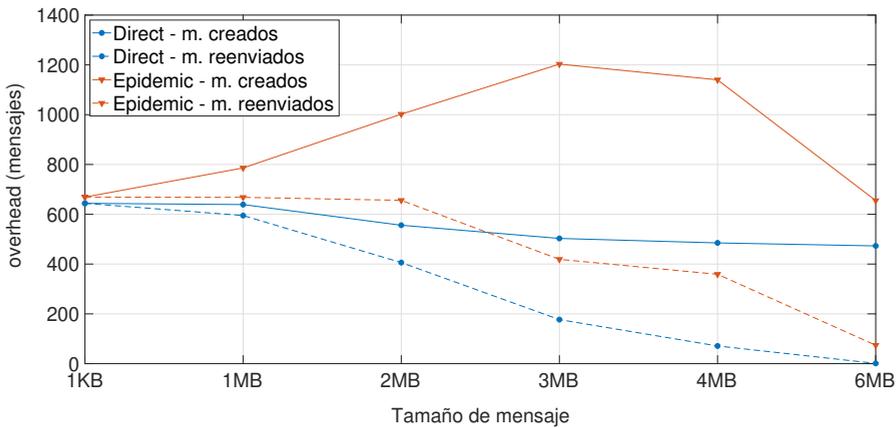


Figura 4.7: Overhead, mensajes creados y reenviados dependiendo del tamaño de mensaje para el escenario de la *Estación* con media afluencia (14-15h).

más tiempo para recibir el mensaje, de modo que también se aumenta el delivery ratio. Por ejemplo, para un mensaje de 2MB, el protocolo direct delivery tiene un delivery ratio de 0.56, mientras que con Epidemic se incrementa a 0.98. Adicionalmente, el número de nodos que reciben el mensaje se incrementa de 375 a 650.

Finalmente analizamos el overhead, concentrándonos en dos valores: (1) el número de *mensajes creados*, que comprenden todos los mensajes empezados a transmitir, y (2) el número de *mensajes reenviados* que son todos los mensajes transmitidos satisfactoriamente. Hay que destacar que si todos los mensajes son transmitidos satisfactoriamente ambos valores son iguales, pero cuando la duración del contacto es baja y el tamaño de mensajes es grande, muchos mensajes no pueden ser transmitidos satisfactoriamente, ya que no tienen suficiente tiempo, y por lo tanto, el número de mensajes reenviados será menor que los mensajes empezados a transmitir. Los resultados se muestran en la figura 4.7, donde podemos apreciar que para los mensajes de 1KB todos los mensajes son transmitidos satisfactoriamente porque ambos valores son iguales; cuando el tamaño de mensaje se incrementa a 1MB algunos mensajes no son reenviados, la peor situación es para el tamaño de mensaje de 6MB, ya que muchos de estos mensajes no son reenviados.

4.5. Conclusiones

Durante este capítulo hemos evaluado el rendimiento de los protocolos de enrutamiento sobre los distintos escenarios de la Plaza, evaluando como la renovación de personas influye en el delivery ratio y delivery time, además del gran overhead que puede existir en la red, particularmente con los mensajes de gran tamaño.

Excluyendo a Epidemic y PRoPHET, el delivery ratio de los protocolos de enrutamiento es muy similar en todos los escenarios. Sin embargo, tomando en consideración otros aspectos como el delivery time, los algoritmos de inundación controlada como Spray & Wait obtienen buenos resultados con una sobrecarga baja.

En el segundo grupo de experimentos, se ha evaluado la difusión de información sobre los escenarios de la Estación, con los protocolos Direct Delivery y Epidemic. Los experimentos muestran que el tamaño de mensaje tiene un gran impacto en la difusión del mismo, al incrementarse el tiempo necesario para su transmisión.

Además, se puede afirmar que los protocolos de enrutamiento actuales, no han sido diseñados para ser usados en este tipo de escenarios, donde los peatones pueden entrar o salir, por lo que es muy importante definir nuevas metodologías que nos permitan evaluarlos y obtener mejores prestaciones.

Capítulo 5

Mejora de la Difusión de Mensajes de Gran Tamaño

5.1. Introducción

En Redes Oportunistas, el principal problema que nos podemos encontrar con la diseminación de la información, es la poca difusión que tienen los mensajes de gran tamaño, ya que el tiempo de transmisión de estos es muy grande, especialmente cuando muchos de los contactos son de baja duración. Debido a esto, muchos de estos mensajes grandes no alcanzan a transmitirse satisfactoriamente. Por lo que hemos propuesto una modificación del protocolo epidemic, al que hemos llamado *EpidemicX2*.

Entre las pruebas realizadas tenemos en primer lugar, la difusión de mensajes en los escenarios creados de la *Plaza de la Virgen*, donde basándonos en los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en el capítulo anterior, se le han colocado dos nodos fijos, con el fin de actuar como puntos de difusión de la información. Debido a estos nuevos nodos, como se muestra en la tabla 5.1 el tiempo de contacto entre los nodos ha aumentado con respecto a la tabla 3.4, que se ha mostrado en la sección 3.3.1, teniendo un efecto positivo en la difusión de la información. Del mismo modo se ha utilizado *EpidemicX2* para aumentar la difusión de la información en el escenario de la *Estación de Alameda*, con lo que hemos tenido grandes mejoras en el ratio de difusión.

Tabla 5.1: Número de contactos y el promedio de su duración para las diferentes tasas de renovación en los escenarios de la Plaza con los nodos fijos para difundir información.

Escenario	Número de contactos	Duración Promedio (seg.)
No Renovación	67742	12.29
Baja Renovación	64333	11.64
Media Renovación	65985	11.16
Alta Renovación	62084	9.89

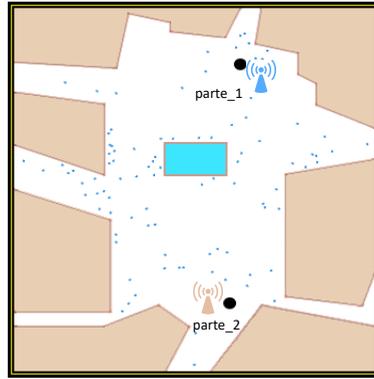
Adicionalmente, se ha utilizado nuestra propuesta sobre trazas vehiculares reales, enfocándonos en determinados rangos horarios donde el número de usuarios puede variar. Los experimentos se han realizado con el fin de difundir información de interés, como anuncios publicitarios, información turística desde el ayuntamiento, o cualquier información de interés que se requiera enviar a los peatones que se encuentran en la plaza o en la estación, o a los usuarios del servicio de taxi.

Los resultados obtenidos con nuestra propuesta muestran una mejora desde el 15 % hasta el 75 % en algunos escenarios. Durante todo este capítulo veremos los resultados de las métricas obtenidas de nuestra propuesta, además de algunos enfoques prácticos para entender el funcionamiento de *EpidemicX2*.

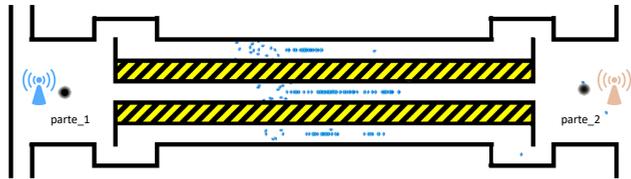
5.2. Mejora en la Difusión de los Mensajes Grandes con EpidemicX2

Durante todo el desarrollo de esta tesis nos hemos encontrado con inconvenientes en la difusión. El problema surge al intentar transmitir mensajes grandes. Por ejemplo, asumiendo que queremos enviar un mensaje de 6MB y utilizando una conexión Bluetooth en un ancho de banda de 2Mbps, necesitará aproximadamente $6MB \cdot 8/2Mbps = 24s$ para transmitir el mensaje. Tal como se muestra en la figura 3.6a (sección 3.3.2), podemos apreciar la duración de contactos a través de la gráfica *CDF* para los escenarios de la Plaza, donde tan solo el 10% de los contactos tienen una duración mayor a 30 segundos. La duración de contacto estableciendo nodos fijos es aun más crítica, ya que estos nodos actúan como la fuente origen de difusión de los mensajes. Por ejemplo, en los escenarios de la Estación, los nodos fijos están ubicados en la entrada de la estación, y la duración promedio de contacto con estos nodos fijos es de 20 segundos, haciendo imposible transmitir los mensajes grandes, por lo que la difusión de estos mensajes no puede comenzar, como se ha detallado en el capítulo 4.

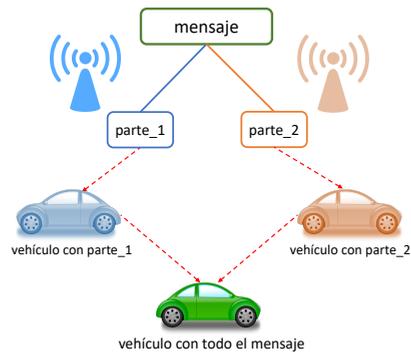
5.2. Mejora en la Difusión de los Mensajes Grandes con EpidemicX2



(a) Ubicación en Plaza



(b) Ubicación en Estación



(c) Funcionamiento en los escenarios vehiculares

Figura 5.1: Funcionamiento del protocolo EpidemicX2.

En concreto, el funcionamiento de *EpidemicX2* se basa en la fragmentación del mensaje original en dos partes que son transmitidas por dos nodos fijos. Por ejemplo, en la imagen 5.1c, los vehículos que están en contacto con el AP1 son infectados con la *parte_1*, mientras los taxis que hacen contacto con el AP2 son infectados con la *parte_2*. Entonces la difusión de las dos partes del mensaje se basan en el uso del protocolo epidémico. De este modo, estos mensajes más pequeños tienen más probabilidades de ser transmitidos. Finalmente, solo cuando los vehículos reciben ambas partes del mensaje, éste se considera recibido.

La implementación de *EpidemicX2* es sencilla desde una aplicación móvil, ya que no requiere ninguna modificación de la capa de transporte o de la capa de red. Hay que tener en cuenta que, en estas capas, un mensaje grande ya está fragmentado en paquetes pequeños para ajustarse a la *Unidad de transmisión máxima (Maximum Transfer Unit (MTU))* de la red, con el fin de mejorar el rendimiento en la transmisión. Sin embargo, la recepción del mensaje no es satisfactoria hasta que se han recibido todos los paquetes.

El proceso seguido para esta difusión es el siguiente: primero, la infraestructura divide la información en dos partes, y a cada una de estas partes se les asigna una identificación; posteriormente estos mensajes son redireccionados a los nodos fijos, y a cada una de estas partes se les asigna un orden diferente en el que serán transmitidas. En otras palabras, el primer mensaje transmitido por cada nodo fijo es diferente. Este punto es clave, ya que si ambos nodos empiezan a transmitir el mismo mensaje, el otro mensaje podría no ser transmitido en la mayoría de los casos. La aplicación móvil es la responsable de recibir, almacenar y reenviar los dos mensajes, como si se tratara del protocolo *Epidemic* estándar. Sin embargo, solo cuando ambas partes del mensaje son recibidas, la aplicación notificará al usuario de que la información ha sido recibida.

En los escenarios evaluados hemos considerado colocar solo dos nodos fijos, en aquellas ubicaciones que tienen alto grado de contacto. Cómo se ha detallado en la sección 4.4, estos nodos fijos pueden ser localizados en lugares estratégicos para mejorar la diseminación de la información. En el escenario de la Estación los nodos fijos están ubicados en los torniquetes, y en el caso de la Plaza en dos entradas opuestas como se puede ver en las figuras 5.1a y 5.1b. En el caso de los experimentos con trazas vehiculares reales, se ha realizado un estudio previo para determinar cuáles son las mejores (y posibles posiciones) para colocar estos nodos difusores, por lo que, en Roma los nodos fijos se encuentran ubicados en la plaza Venecia, y para la ciudad de San Francisco han sido estratégicamente puestos en uno de los estacionamientos de las empresas encargadas de prestar el servicio de los taxis.

Finalmente el proceso de evaluación utilizando por el protocolo *EpidemicX2* se realiza de la siguiente manera: el simulador ONE es configurado para empezar

la difusión de dos mensajes diferentes con la mitad de tamaño. Los nodos fijos también se han definido cómo los responsables de enviar inicialmente estos mensajes. ONE también ha sido configurado para enviar los mensajes siguiendo un esquema *FIFO*, asegurando que cada nodo fijo transmita una parte diferente del mensaje. Cuando un nodo recibe las dos partes del mensajes, este considera que la información ha sido entregada, tomando en cuenta únicamente el tiempo en el que la segunda parte es recibida. De esta manera, podemos obtener las mismas métricas que existen para los protocolos ya implementados.

Entonces, siguiendo las evaluaciones previas de los escenarios peatonales, un mensaje de 6MB puede ser fragmentado en dos partes, con lo que el tiempo de transmisión de cada parte se reduce a 15 segundos. Este tiempo es menos que la duración del contacto con los nodos fijos, permitiendo el comienzo de la difusión de estos mensajes fragmentados, y también aumenta la posibilidad de transmitir con éxito las distintas partes del mensaje cuando se produce el contacto entre nodos móviles. Como veremos en los experimentos, este enfoque incrementa considerablemente el *delivery ratio* para mensajes de información con tamaños mayores a 2MB, y además reduciendo el *delivery time*. Básicamente, de esta manera, los nodos fijos tienen más oportunidad de entregar esos mensajes iniciales a los nodos cercanos. Los dispositivos móviles pueden recibir y reensamblar ambas partes del mensaje en las localizaciones donde el número de contactos y duración de estos son mas grandes, que como se muestra en la figura 3.9, que corresponden a los puntos de interés de la plaza y las plataformas en la estación.

Entonces, nuestro propósito inicial es dividir el mensaje en dos trozos. Ahora, sin embargo, este protocolo básico puede extenderse para tener una mayor fragmentación, y así mejorar la difusión de mensajes mas grandes, pero con un costo adicional, el de aumentar el *overhead* de mensajes en la red, como veremos en la siguiente sección.

5.3. Evaluación con los Escenarios *Peatonales*

En esta sección, realizamos la evaluación sobre la mejora del rendimiento que hemos realizado sobre la difusión de información en los escenarios que ya han sido descritos en las secciones previas y donde ya se han evaluado distintos aspectos de este tipo de escenarios con distintos grados de renovación o afluencia. Siguiendo las evaluaciones anteriores, se han considerado tres métricas para evaluar el rendimiento: el *delivery ratio* (ratio de entrega), el *delivery delay* (retardo de entrega) y finalmente el *overhead* (sobrecarga) de los diferentes protocolos especificado con dos valores: (1) el número de mensajes creados y empezados a transmitir, y (2) el número de mensajes reenviados o transmitidos satisfactoriamente.

5.3.1. Escenarios de la Plaza

Empezaremos con la evaluación de los escenarios de la Plaza. En la figura 5.2 se muestra el delivery ratio dependiendo del tamaño de mensaje para los cuatro diferentes escenarios. Primero, vemos que el protocolo *Direct Delivery* tiene un desempeño deficiente en comparación con los protocolos epidémicos, con delivery ratio por debajo de 0.5 para los mensajes de 1KB, y podemos ver claramente como decrece para los mensajes más grandes, ya que requieren mayor tiempo de transmisión.

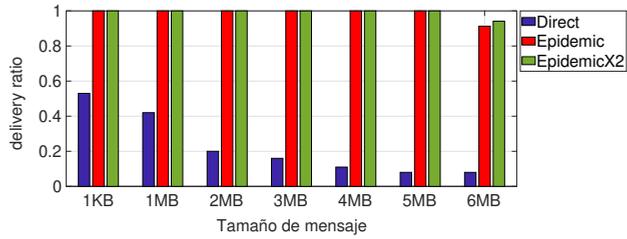
Para el protocolo *Epidemic*, podemos ver que la eficiencia para los mensajes menores a 2MB es casi 1, lo que da a entender que casi todos los nodos recibieron el mensaje. Para mensajes más grandes, vemos que el delivery ratio se reduce, especialmente en los escenarios de media y alta renovación. Incrementando la tasa de renovación, desde la media renovación, implica que algunos nodos dejan el lugar antes de que el mensaje les sea entregado. Mas detalladamente, los resultados para un mensaje de 6MB muestran que el delivery ratio se reduce dramáticamente. La principal razón es el tiempo de transmisión de los mensajes, que es aproximadamente $6\text{MB} \cdot 8/2\text{Mbps} = 24\text{s}$ y teniendo en cuenta que más del 90% de los contactos en la plaza tienen una duración menor a los 24 segundos, como se puede ver en la figura 3.6a, esto implica que muy pocos mensajes son transmitidos satisfactoriamente. Esto es particularmente importante en los nodos fijos, como muestran los valores de Direct Delivery que están cerca al cero, ya que entonces la difusión de estos mensajes no puede empezar.

Para aclarar la dinámica de la esta difusión de mensajes, en la figura 5.3 se muestra la evolución del número de nodos con mensajes para el escenario con media renovación. Podemos ver, que con respecto a el protocolo *Epidemic*, para los mensajes de tamaño pequeño (1KB), donde el delivery ratio es cerca de uno, se puede observar que la difusión se realiza muy rápida, difundiendo el mensaje cuando las personas entran en la plaza, lo que se aprecia en el perfil de la curva parecido a una escalera. Para los mensajes de tamaño más grande la difusión es menor, suavizandose el patrón de la escalera.

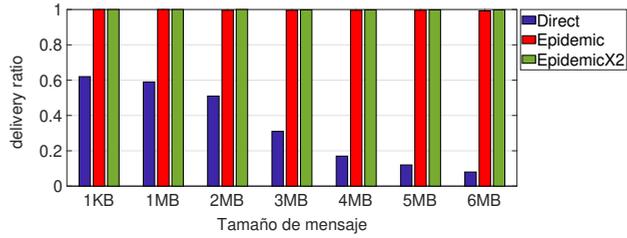
Cómo se ha detallado en la sección 5.2, para mejorar la difusión de los mensajes más grandes, hemos propuesto el protocolo *EpidemicX2*. En la figura 5.2 podemos ver que el delivery ratio es mayor en comparación al protocolo *Epidemic*, particularmente para mensajes mayores a 5MB. Además, en la figura 5.3, en el protocolo *EpidemicX2* para la diseminación de mensajes entre 4MB y 6MB, se puede ver que la difusión es más rápida que la correspondiente difusión con el protocolo Epidemic estándar. Resumiendo, los experimentos muestran que este enfoque incrementa considerablemente el delivery ratio para los mensajes grandes.

Ahora evaluaremos el delivery time de los mensajes, como se muestra en la

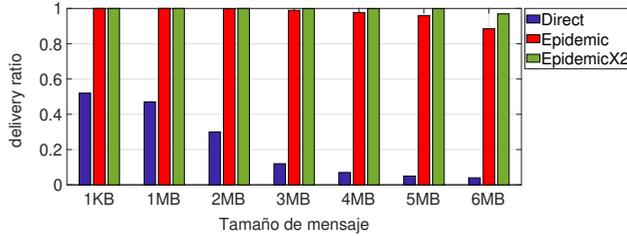
5.3. Evaluación con los Escenarios *Peatonales*



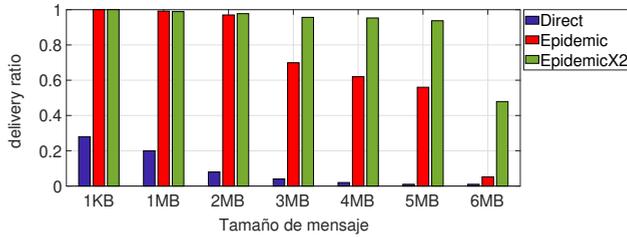
(a) No renovación



(b) Baja renovación



(c) Media renovación



(d) Alta renovación

Figura 5.2: Delivery ratio para los protocolos de difusión de mensajes en los escenarios de la *Plaza*.

5. MEJORA DE LA DIFUSIÓN DE MENSAJES DE GRAN TAMAÑO

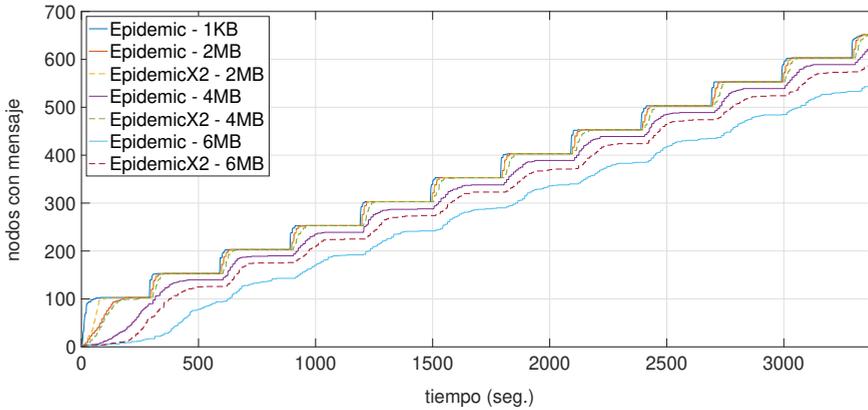


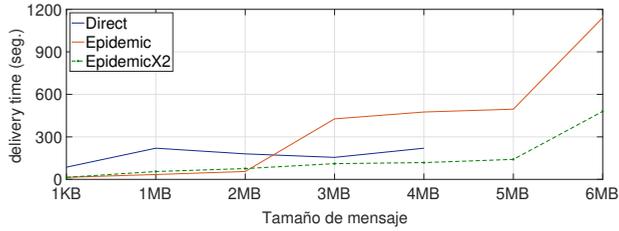
Figura 5.3: Número de nodos con copia del mensaje en el escenario de la *Plaza* con media renovación.

figura 5.4. Antes de empezar hay que aclarar que estos valores han sido calculados solo cuando se ha entregado todo el mensaje, es decir, cuando el nodo tiene las dos partes. De esta manera, cuando el delivery ratio es muy bajo, que es cuando solo se han recibido pocos mensajes, la representatividad de estos resultados es mínima. Por lo tanto, cuando el número de mensajes entregados esta por debajo de 10, estos valores son omitidos de los gráficos por no ser representativos.

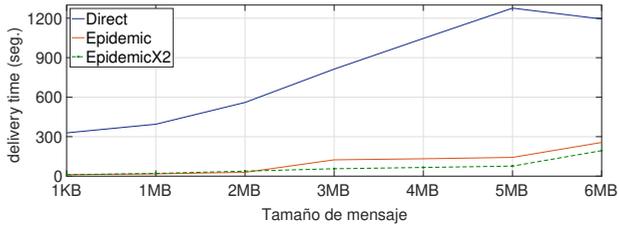
En general, podemos ver que el delivery time incrementa con el tamaño del mensaje, particularmente para ambos protocolos epidémicos cuando el tamaño de los mensajes es mas grande que 3MB. Dependiendo del escenario, los resultados muestran que este delivery time disminuye con la tasa de renovación. Particularmente, para el escenario con media y alta renovación esta disminución se debe a que los nodos se quedan menos tiempo en el lugar, por lo que el tiempo y la oportunidad de recibir el mensaje se reduce, lo que se refleja en el delivery time. Por ejemplo, en el escenario con alta renovación, el delivery time se mantiene por debajo de los 100 segundos. Esto tiene sentido ya que 60 segundos es el tiempo promedio que los nodos permanecen dentro del lugar en este escenario. Por el contrario, en escenarios donde los nodos se quedan por más tiempo, existe mas tiempo para ser entregado el mensaje.

Finalmente, evaluamos los resultados del overhead, como se muestran en la figura 5.5. Primero, analizamos los resultados obtenidos con el protocolo Direct Delivery, y vemos que el número de mensajes creados incrementa con el tamaño del mensaje, a pesar de que el número de mensajes entregados disminuye. La principal

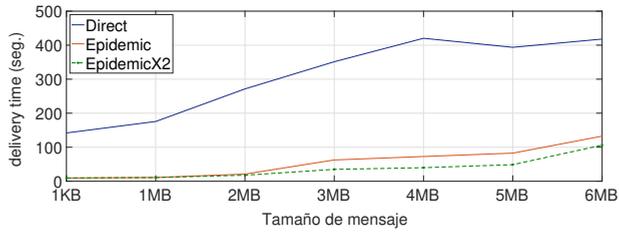
5.3. Evaluación con los Escenarios *Peatonales*



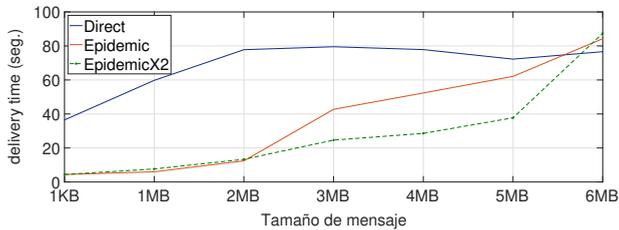
(a) No renovación



(b) Baja renovación



(c) Media Renovación



(d) Alta Renovación

Figura 5.4: Delivery time de los protocolos de difusión de mensajes en los escenarios de la *Plaza*. Cuando los mensajes entregados son menores a 10, el delivery time no es representativo, y por lo tanto se omiten en los gráficos.

5. MEJORA DE LA DIFUSIÓN DE MENSAJES DE GRAN TAMAÑO

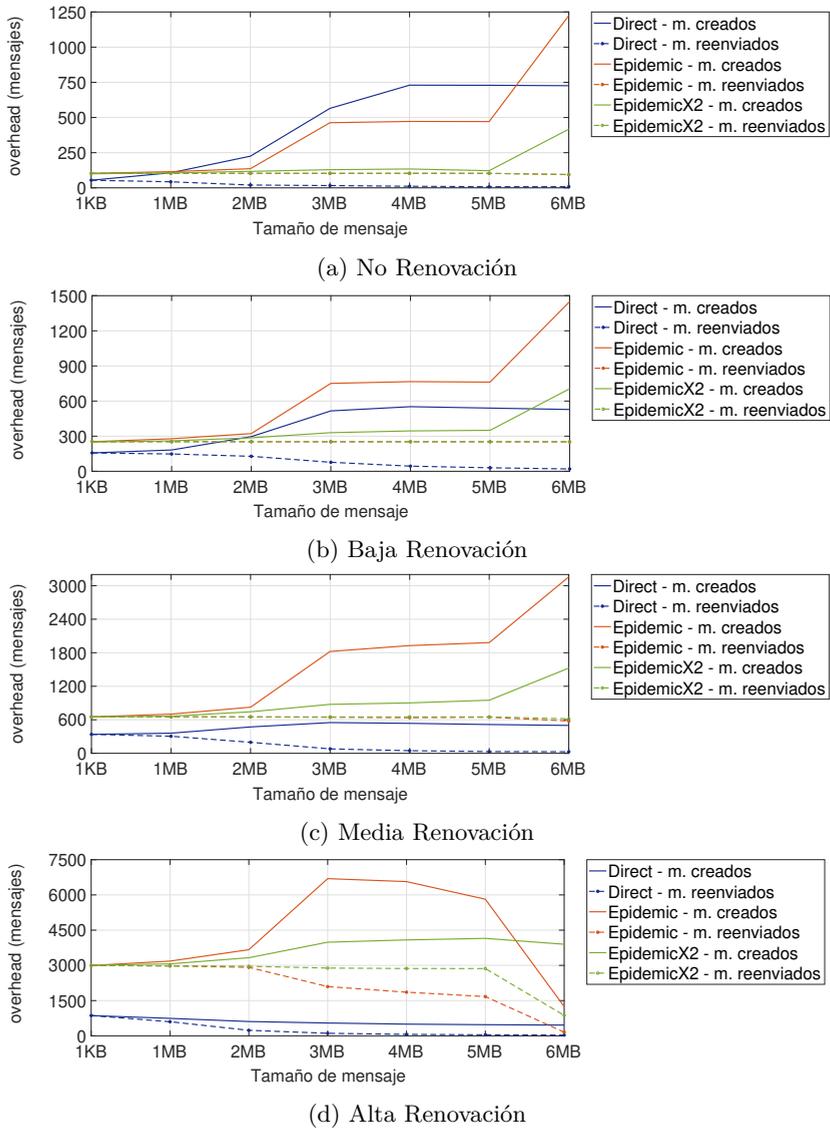


Figura 5.5: Overhead de los protocolos de difusión de mensajes en los escenarios de la Plaza.

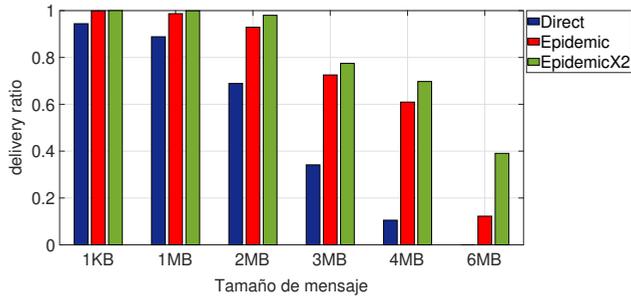
razón es que con los mensajes grandes, el tiempo de transmisión incrementa, y la entrega disminuye, incrementando de esta manera el número de retransmisiones insatisfactorias. Para los protocolos epidémicos, podemos ver que para los mensajes pequeños hasta los 2MB, la mayoría de mensajes son transmitidos satisfactoriamente ya que el número de mensajes creados y entregados son aproximadamente iguales. Particularmente, para el protocolo EpidemicX2, vemos que para tamaños de mensajes inferiores a 6MB, el overhead es menor que para los otros protocolos; sin embargo, para los mensajes de mayor tamaño, el overhead se reduce ya que el delivery ratio es mayor, lo que reduce el número de retransmisiones. Además, dependiendo del escenario, podemos ver que el overhead se incrementa para los escenarios con mayor renovación, ya que la cantidad de nodos y su movilidad aumentan. Con respecto a los resultados del escenario de alta renovación (ver la figura 5.5d), vale la pena mencionar que la reducción de los mensajes creados para mensajes de 6MB es un efecto del tiempo de transmisión más largo, que reduce el número de contactos, y por lo tanto el número de mensajes creados.

5.3.2. Escenarios de la Estación

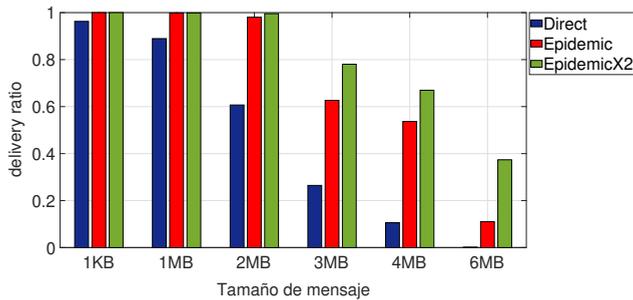
Esta subsección está destinada a evaluar la difusión de la información en los diferentes escenarios de la Estación así como la evaluación del protocolo EpidemicX2. Empezamos con el análisis de los resultados del delivery ratio mostrados en la figura 5.6. Podemos ver que para los mensajes pequeños (1KB), el delivery ratio es casi 1 para todos los protocolos. La principal razón es que el tiempo de transmisión para estos mensajes pequeños es muy corto, y que los mensajes pueden ser transmitidos incluso cuando el tiempo de contacto es también muy corto. Incrementar el tamaño de mensaje tiene un impacto evidente en el rendimiento de los protocolos, especialmente en Direct Delivery, ya que la duración del contacto con los nodos fijos algunas veces no es lo suficientemente larga para transmitir el mensaje completamente, por lo que entonces muchos nodos no reciben el mensaje. Particularmente, los resultados para el tamaño de mensaje de 6MB muestran que el delivery ratio se reduce dramáticamente, incluso en las horas pico como el escenario de 08-09h, donde el protocolo *Epidemic* no puede entregar ningún mensaje. Por otro lado, tenemos al protocolo *EpidemicX2* que incrementa considerablemente el delivery ratio para entregar contenidos con tamaño superior a 2MB, e incluso permite la entrega del 20% del contenido de 6MB en el escenario con alta afluencia (08-09h).

En la figura 5.7 se muestra la difusión de los mensajes dependiendo del tiempo. Por ejemplo, para el protocolo *Epidemic* con mensajes entre 1KB y 2MB la difusión es constante a lo largo de todo el tiempo, a pesar de que para el protocolo *Direct Delivery* los mensajes con tamaño de 1MB la difusión se reduce ligeramente. Para

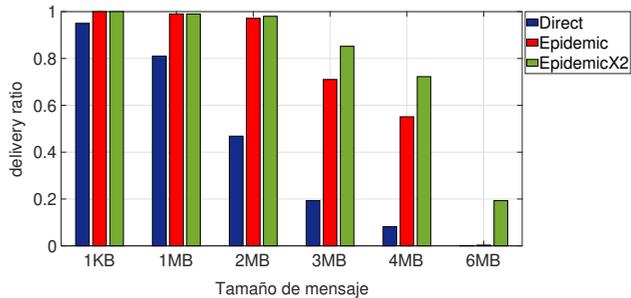
5. MEJORA DE LA DIFUSIÓN DE MENSAJES DE GRAN TAMAÑO



(a) Baja (19-20h)



(b) Media (14-15h)



(c) Alta (08-09h)

Figura 5.6: Delivery ratio de los protocolos de difusión de mensajes en los escenarios de la *Estación*.

los mensajes de 4MB, la tasa de difusión es menor, particularmente para el protocolo *Direct Delivery*. Finalmente, para los mensajes de 6MB, ésta es claramente reducida, mostrando que la difusión para el protocolo *Epidemic* no empieza hasta

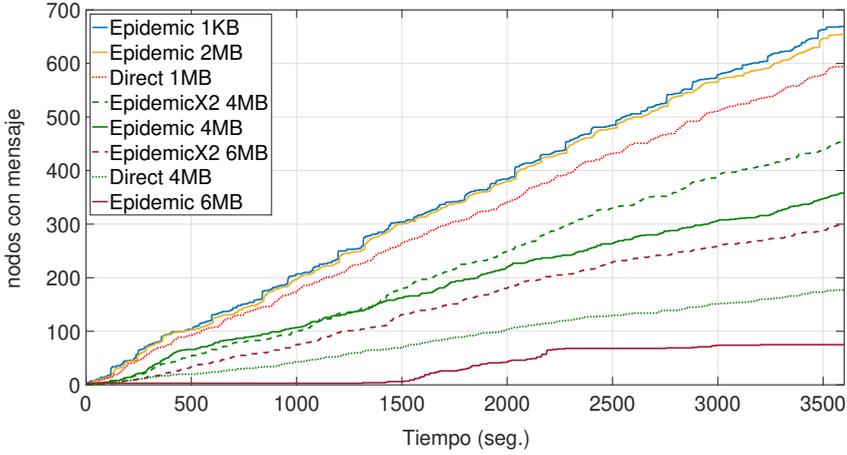


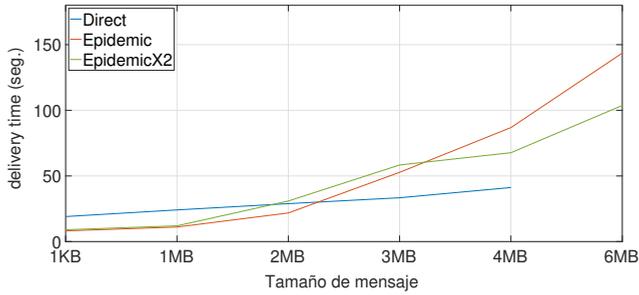
Figura 5.7: Número de nodos con copia del mensaje en el escenario de la *Estación con media afluencia (14-15h)*.

el segundo 1500, que es cuando un nodo fijo ha podido entregar el mensaje a un nodo. Aún así a partir de este punto la difusión es muy baja. Por otro lado, ya que el protocolo *EpidemicX2* divide este mensaje en dos partes, permite empezar la difusión al inicio del experimento, y de este modo incrementa la tasa de difusión.

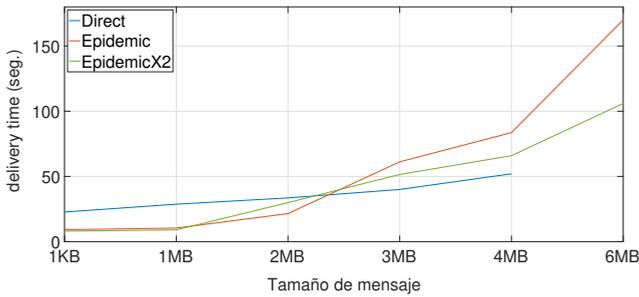
La figura 5.8 muestra los resultados obtenidos de evaluar el *delivery time*, que, en este escenario particular, es el tiempo promedio que las personas deben esperar para obtener la información cuando ingresan a la estación. Note que, como en los escenarios de la *Plaza*, cuando el número de mensajes entregados es inferior a 10, el *delivery time* es omitido por no ser representativo. Se puede ver que, como se esperaba, cuando el tamaño de mensaje se incrementa, el *delivery time* también se incrementa. Es importante resaltar que la razón para tener un elevado *delivery time* para el protocolo *Epidemic* si lo comparamos con *Direct Delivery*, es que el protocolo *epidemic* permite más tiempo para recibir el mensaje, incrementando entonces el *delivery ratio*. Por ejemplo, para un mensaje de 2MB en el escenario con media afluencia (14-15h), *Direct Delivery* tiene un *delivery ratio* de 0.56, mientras que con *Epidemic* esta relación aumenta a 0.98. Por lo tanto, el número de nodos que han recibido el mensaje se incrementa de 375 a 650, en el rango horario de 14 a 15 horas. Finalmente, podemos ver que *EpidemicX2* reduce el *delivery time* por la fragmentación del mensaje. Respecto a los diferentes escenarios, los resultados son muy similares.

Finalmente analizamos el rendimiento en términos de *overhead* como se puede

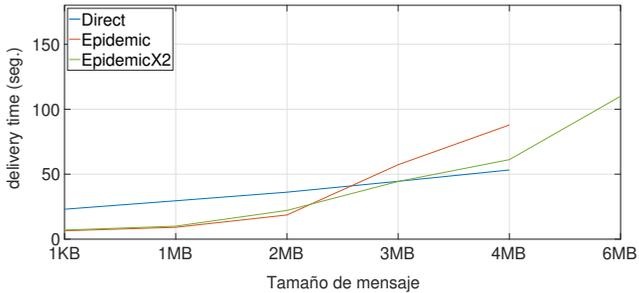
5. MEJORA DE LA DIFUSIÓN DE MENSAJES DE GRAN TAMAÑO



(a) Baja (19-20h)



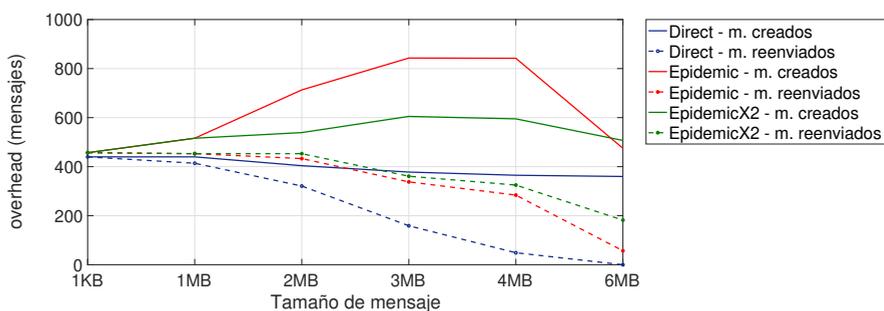
(b) Media (14-15h)



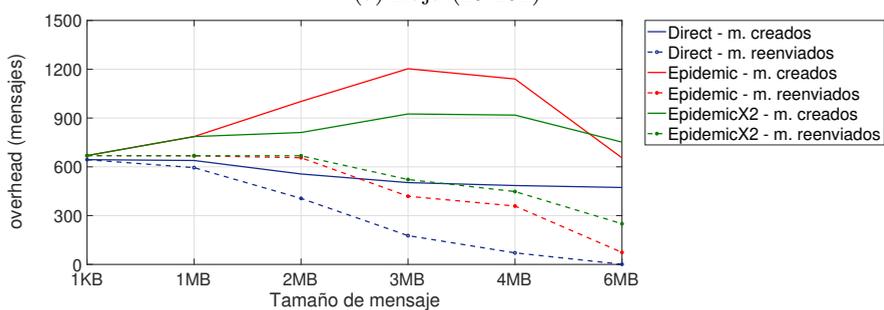
(c) Alta (08-09h)

Figura 5.8: Delivery time de los protocolos de difusión de mensajes en los escenarios de la *Estación*. Cuando el número de mensajes entregados es menor a 10, el delivery time no es representativo, por este motivo se omiten en los gráficos.

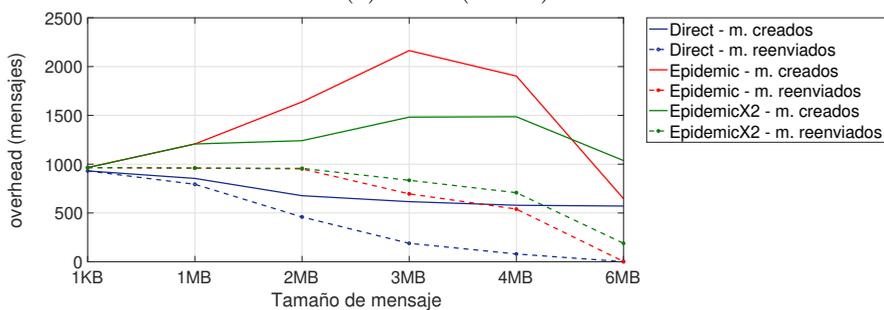
5.3. Evaluación con los Escenarios *Peatonales*



(a) Baja (19-20h)



(b) Media (14-15h)



(c) Alta (08-09h)

Figura 5.9: Overhead de los protocolos de difusión de mensaje en los tres escenarios de la *Estación*.

ver en la figura 5.9. Podemos ver que para mensajes de tamaño de 1KB, todos los mensajes son entregados satisfactoriamente porque ambos valores son igua-

les. Cuando se incrementa el mensaje a 1MB, algunos de estos mensajes no son entregados. Finalmente, para mensajes de 6MB, muchos de ellos no se entregan. En el caso de nuestro protocolo *EpidemicX2*, el overhead se incrementa porque se crean un poco más de mensajes debido a su política de fragmentación y al mismo tiempo más mensajes son enviados y recibidos. Sin embargo, si tenemos en cuenta el número de bytes transmitidos, el overhead es menor a la del protocolo epidémico. Finalmente, dependiendo del escenario, podemos ver que el overhead se incrementa debido a los escenarios con gran número de nodos, particularmente en la hora punta (08-09h).

5.4. Evaluación con los Escenarios *Vehiculares*

En esta sección, evaluamos los principales aspectos que afectan la distribución de mensajes sobre los escenarios vehiculares con nuestro propósito para mejorar la diseminación de la información y evaluar nuestro protocolo *EpidemicX2*. Para ello, vamos a utilizar los escenarios descritos en la sección 3.4, denominados *Roma* y *San Francisco*.

Primeramente, para evaluar la duración del contacto, nosotros hemos procesado previamente las trazas de tráfico para obtener los contactos y la duración de estos. Desde estos valores, obtenemos la función de distribución acumulativa (CDF de la duración de los contactos que es $P(X \leq T)$) como se muestra en la figura 3.13.

Como ya se comentó en el capítulo 3, podemos ver que la gran mayoría de estos contactos tienen corta duración. Los resultados de Roma no muestran una diferencia significativa entre los diferentes rangos horarios. Por otro lado, los resultados de San Francisco muestran diferencias entre la distribución de contacto para los rangos de tiempo evaluados. Además, la duración de contactos es más larga en la traza vehicular de San Francisco con respecto a la traza de la ciudad de Roma, teniendo una proporción significativa de contactos con larga duración. La razón principal de este comportamiento es que los taxis de San Francisco generalmente regresan al aparcamiento de las compañías de taxis, donde tienen lugar estos contactos de larga duración.

Basado en estos resultados, podemos evaluar ahora cómo la duración del contacto afecta a la difusión de los mensajes. Por ejemplo, podemos ver en la figura 3.13a que cerca del 80% de los contactos tienen una duración menor a 50 segundos. Basados en esta distribución, y asumiendo que utilizamos una conexión WiFi como se puede ver en los parámetros de la tabla 5.2, solo podemos transmitir mensajes de menos de 12.5MB ($(12,5 \cdot 8)/2 = 50s$) en estos 50 segundos de tiempo de contacto. Por lo tanto, los mensajes grandes tendrán menos oportunidades de

Tabla 5.2: Parámetros fijos de simulación de los escenarios *Vehiculares*.

Parametros	Valores
Movimiento	Traza real
Area (m2)	40 y 100 Km ²
Interface	WiFi
Tx Rango radio (m)	50
Tx Velocidad (Mbps)	10
Tamaño de mensajes	1KB to 100MB
Memoria del dispositivo	1GB
TTL (min)	720 (default)
Tiempo de simulación (seg.)	7200

entrega y de este modo su difusión se ve reducida.

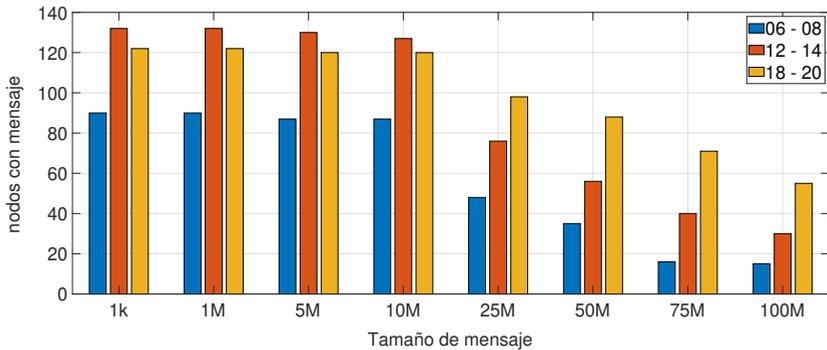
En los siguientes párrafos presentamos la evaluación de la difusión de la información utilizando los escenarios y los ajustes de configuración descritos en la sección 3.4. Los experimentos se realizaron para los seis grupos de escenarios que se describen en la tabla 3.6, para ello hemos usando los protocolos Epidemic y EpidemicX2.

5.4.1. Escenarios de *Roma*

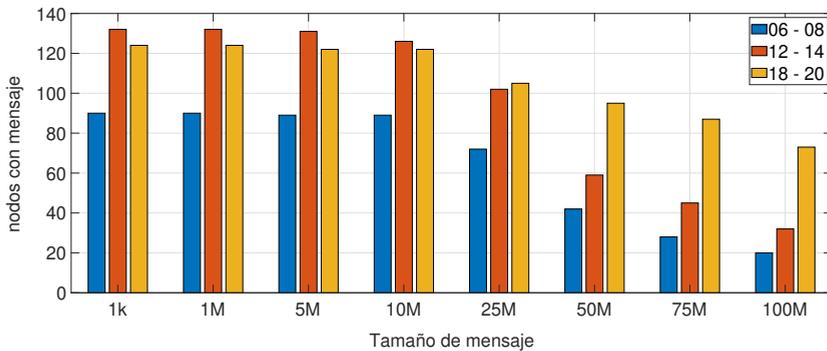
Primeramente, nos enfocamos en la evaluación de los escenarios de Roma. De manera similar a lo que hemos hecho con el resto de escenarios, la métrica de rendimiento más importante para la evaluación de la difusión de la información es el *delivery ratio*, definido como la relación entre los vehículos que recibieron la información y los vehículos activos del escenario considerado. Hay que tener en cuenta que el número de vehículos en circulación no es él mismo en los diferentes rangos horarios, como se muestra en la tabla 3.6. Los resultados se muestran en la figura 5.10 dependiendo del tamaño de los mensajes. Podemos ver que para los mensajes pequeños (≤ 10 MB) el *delivery ratio* es casi 1 para ambos protocolos. Cuando se incrementa el tamaño de mensaje podemos ver que el *delivery ratio* se reduce dramáticamente, particularmente para los dos primeros rangos horarios. Por otro lado, para los mensajes mayores a 10MB y el protocolo EpidemicX2, podemos ver un incremento en el *delivery ratio* de alrededor del 20% (que es muy significativo para mensajes de 25MB, con un incremento del 50%), como resultado de esta fragmentación de mensajes.

La principal razón para este reducido *delivery ratio* para los mensajes grandes, como ya se ha comentado anteriormente, es el tiempo de transmisión de los

5. MEJORA DE LA DIFUSIÓN DE MENSAJES DE GRAN TAMAÑO



(a) Epidemic



(b) EpidemicX2

Figura 5.10: Delivery ratio en función del tamaño de mensaje en la ciudad de *Roma*.

mensajes. Por ejemplo, para un mensaje de 100MB el tiempo de transmisión es aproximadamente $100\text{MB} \cdot 8/2\text{Mbps} = 500\text{s}$, por lo que incluso para los nodos fijos no hay tiempo para transmitir este mensaje a los nodos que pasen cerca. Este hecho es confirmado en la evolución del número de nodos con mensaje, como se muestra en la figura 5.11. Estas figuras muestran para el protocolo Epidemic el número de nodos con mensajes dependiendo del tiempo y para el protocolo EpidemicX2 el número de nodos que han recibido cada parte (M1 o M2) del mensaje. Se muestran tres tamaños de mensaje: 10MB, 50MB y 100MB (para el protocolo EpidemicX2 corresponde a dos partes de 5MB, 25MB y 50MB). En general, podemos ver una mejor difusión cuando dividimos los mensajes, con respecto a

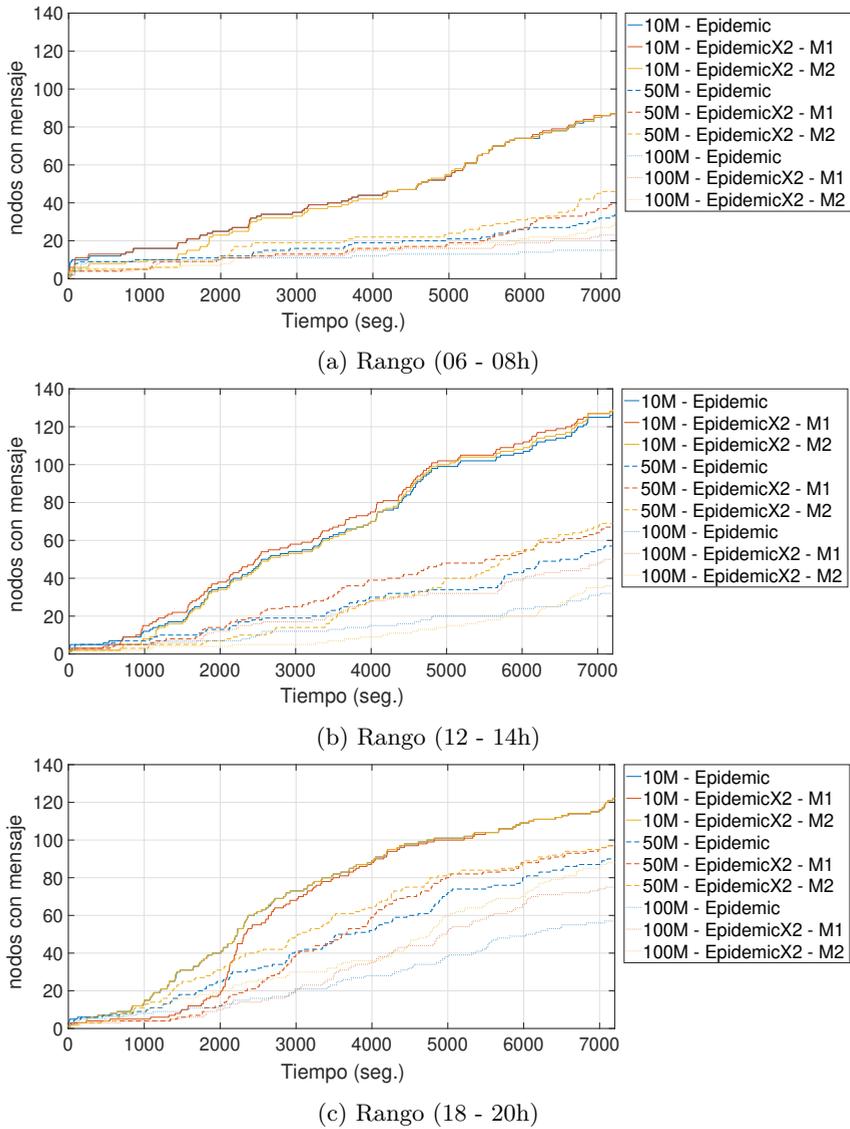
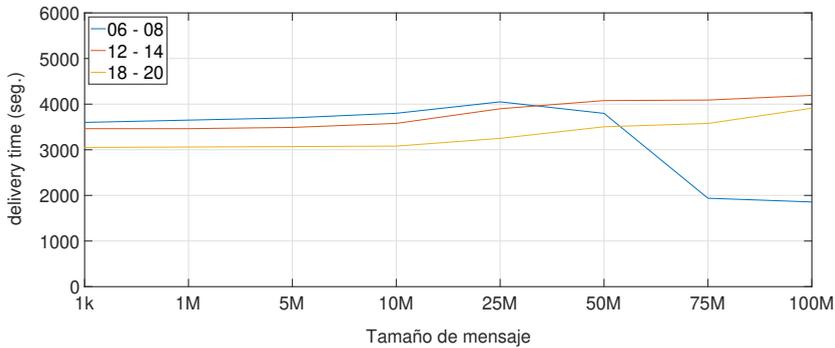
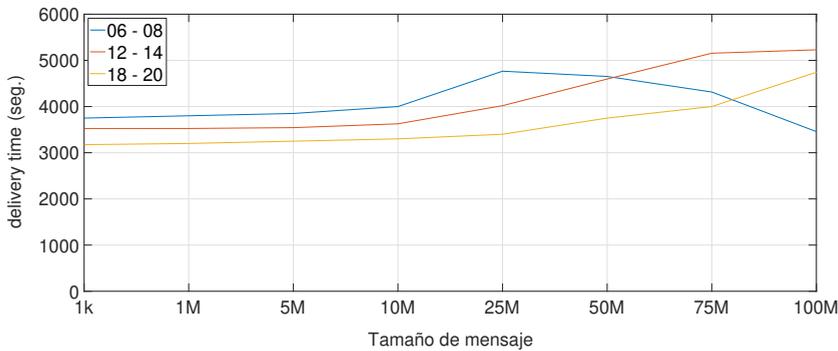


Figura 5.11: Número de nodos con copia del mensaje dependiendo del rango horario en la ciudad de *Roma*.

5. MEJORA DE LA DIFUSIÓN DE MENSAJES DE GRAN TAMAÑO



(a) Epidemic

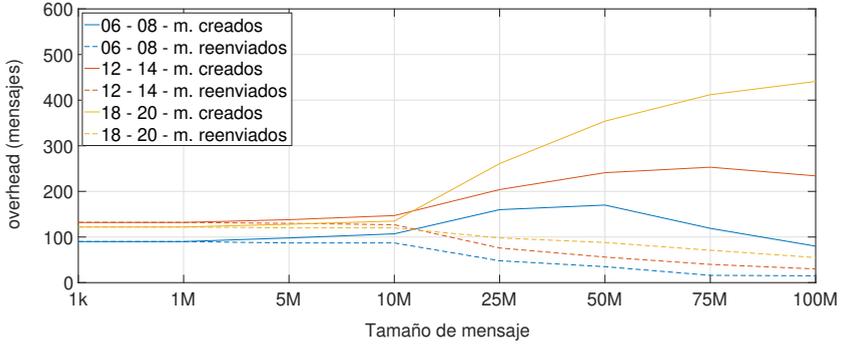


(b) EpidemicX2

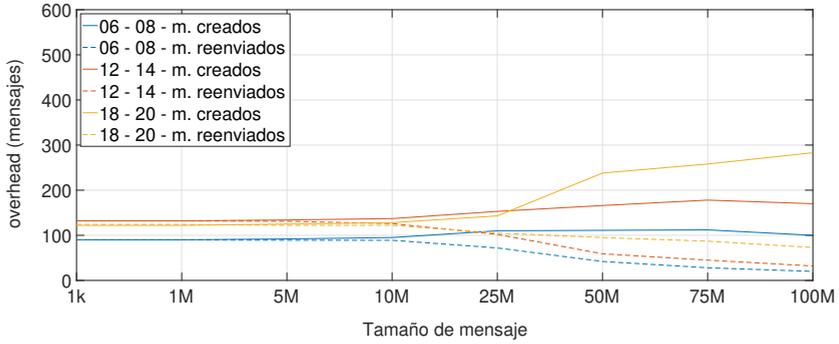
Figura 5.12: Delivery time de los mensajes en la ciudad de *Roma*.

cuando el mensaje se envía entero. Básicamente, de este modo, los nodos fijos y móviles tienen más oportunidades para entregar estas partes más pequeñas del mensaje, y los vehículos pueden recibir el mensaje y ensamblar ambas partes en la localización donde el número de contactos y su duración es mayor.

En la figura 5.12, se muestran los resultados obtenidos de evaluar el *delivery time*, que es el tiempo promedio que deben esperar los taxis para obtener la información generada o el mensaje. Podemos ver que, como se esperaba, cuando el tamaño del mensaje aumenta, el *delivery time* también incrementa. Es importante tener en cuenta que la razón para un elevado *delivery time* de los protocolos epidémicos es porque intentan hacer una entrega satisfactoria, pero si el tiempo de contacto es demasiado pequeño el mensaje no será transmitido satisfactoriamente,



(a) Epidemic



(b) EpidemicX2

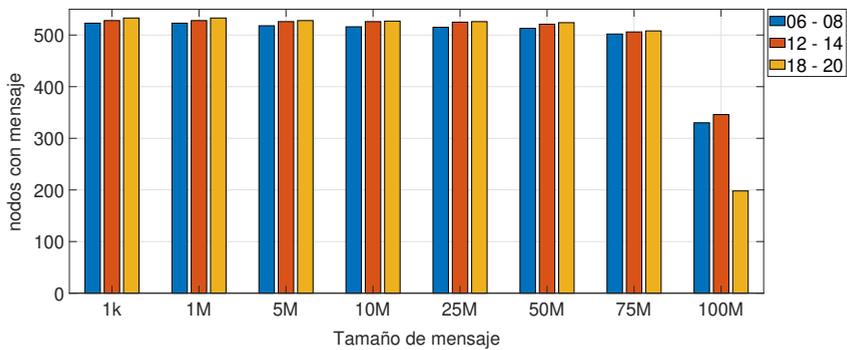
Figura 5.13: Overhead, mensajes creados y reenviados en la ciudad de *Roma*.

y entonces éste debe ser reenviado otra vez en la siguiente oportunidad de contacto. Adicionalmente, podemos ver en las figuras 5.12a y 5.12b en el rango horario de 06 a 08h que para un mensaje de 25MB de tamaño parece que con el protocolo epidemic el mensaje es entregado en menos tiempo. Esto es porque muchos mensajes no son entregados, entonces el delivery time que se tiene en cuenta es de los vehículos que han recibido el mensaje, por lo que se muestra un tiempo más corto.

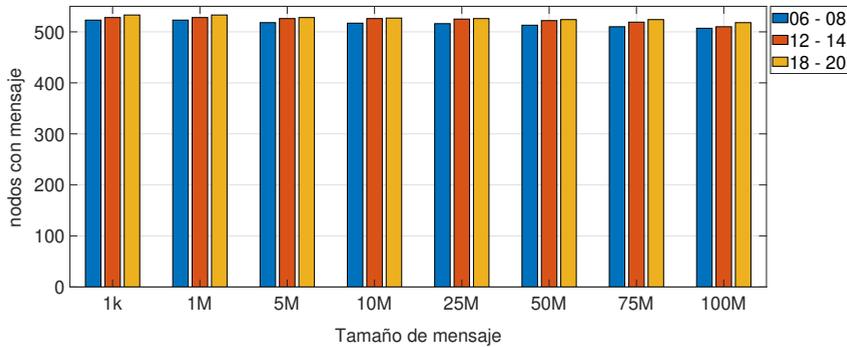
Ahora vamos a evaluar el overhead de ambos protocolos. El overhead es analizado mediante las siguientes dos métricas: (1) el número de *mensajes creados*, que comprende todas las transmisiones empezadas de mensajes, y (2) el número de *mensajes reenviados*, que son todas las transmisiones satisfactorias de mensajes.

5. MEJORA DE LA DIFUSIÓN DE MENSAJES DE GRAN TAMAÑO

En este sentido, si todos los mensajes son transmitidos satisfactoriamente, ambos valores son iguales. En la figura 5.13 vemos que para los tamaños de mensaje de 1KB a 10MB casi todos los mensajes son transmitidos satisfactoriamente ya que ambos valores son iguales. Cuando el tamaño de mensaje se incrementa desde los 25MB a 100MB, muchos de estos no son entregados. Para el protocolo *EpidemicX2*, el overhead es menor, ya que las transmisiones innecesarias se reducen debido a la fragmentación del mensaje, debido a que más mensajes son entregados.



(a) Epidemic



(b) EpidemicX2

Figura 5.14: Delivery ratio en función del tamaño de mensaje en la ciudad de *San Francisco*.

5.4.2. Escenarios de *San Francisco*

Ahora, nos centramos en la evaluación de los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas sobre los escenarios que hemos definido de la ciudad de San Francisco. En las figuras 5.14 se muestra el *Delivery Ratio* para los diferentes tamaños de mensajes. En este escenario, cuando se compara con los escenarios de Roma, podemos ver una mejora en la difusión de los mensajes más grandes. Incluso para el mensaje de 100MB, el protocolo epidemic tiene un delivery ratio entre 0.45 y 0.75, siendo en el protocolo EpidemicX2 prácticamente 1. Esto se debe a que la duración de los contactos son mayores en los escenarios de esta ciudad, como se ha detallado a inicios de la sección 5.4 y en la figura 3.13b, permitiendo la difusión de mensajes más grandes. Por otro lado, para mensajes mayores a 50MB y con el protocolo EpidemicX2, podemos ver un incremento en el delivery ratio alrededor del 30 % como resultado del particionamiento del mensaje.

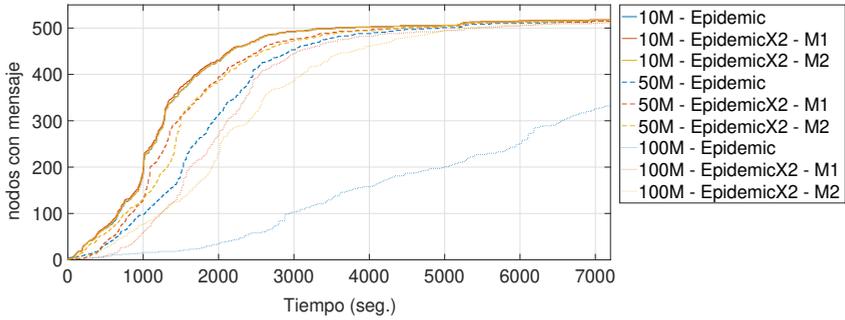
En la figura 5.15 se puede ver el número de mensajes recibidos dependiendo del tiempo para los diferentes rangos horarios y tamaños de mensaje, confirmando la reducción en la difusión de los mensajes de 100MB con el protocolo Epidemic. Entonces, si este mensaje es dividido en dos partes de 50MB, vemos cómo mejora significativamente la difusión.

La figura 5.16 muestra el *delivery time*. En ésta se puede apreciar que el tiempo de entrega se mantiene encima de los 1000 segundos, que es el tiempo promedio que tardan los taxis en regresar a los aparcamientos de la compañía. También podemos apreciar en la figura 5.16b como EpidemicX2 reduce el delivery time respecto al protocolo Epidemic en la figura 5.16a, particularmente para mensajes mayores a 25MB.

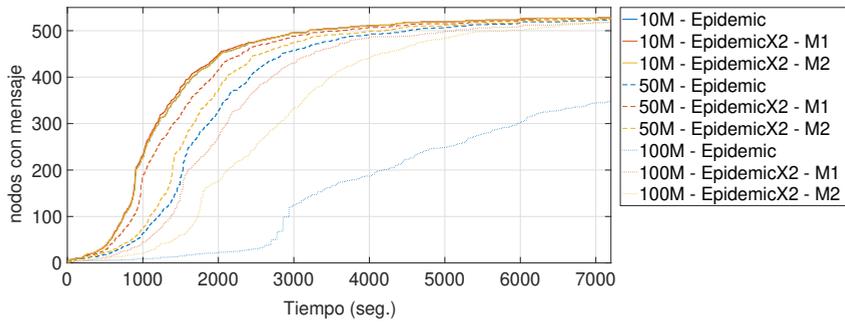
Finalizando la evaluación de la difusión en esta segunda ciudad, analizamos el *overhead*. En la figura 5.17 podemos ver el número de mensajes empezados a transmitir y el número de mensajes entregados. Cómo se aprecia al incrementar el tamaño de los mensajes también se incrementa el overhead en la red, especialmente para el protocolo epidemic cuando intenta hacer envíos de mensajes más largos al requerir una duración de tiempo de contacto mayor. Al contrario, EpidemicX2 requiere tiempos de contacto mas cortos para transmitir cada parte del mensaje, con lo que el número de transmisiones fallidas se reduce, y por consiguiente, el overhead.

Resumiendo, los experimentos muestran que incrementando el tamaño de mensaje, nuestra propuesta el protocolo *EpidemicX2*, obtiene un incremento en la difusión del mensaje y una reducción del delivery time con respecto al protocolo Epidemic, particularmente significativo para los mensajes de gran tamaño. Además, el overhead se reduce notablemente.

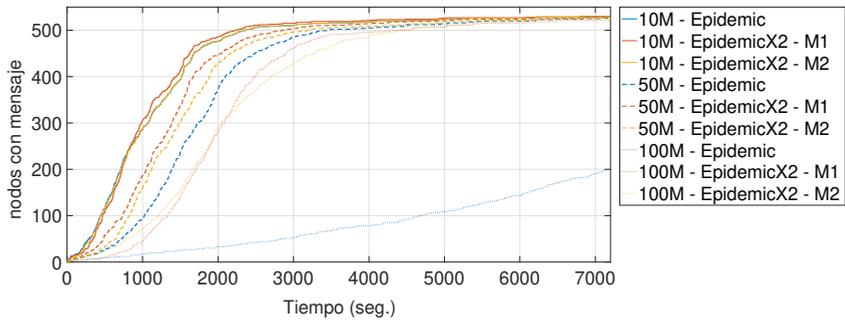
5. MEJORA DE LA DIFUSIÓN DE MENSAJES DE GRAN TAMAÑO



(a) Rango (06 - 08h)

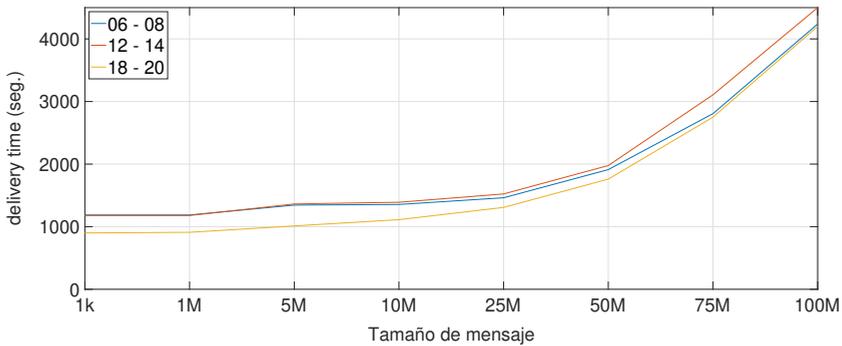


(b) Rango (12 - 14h)

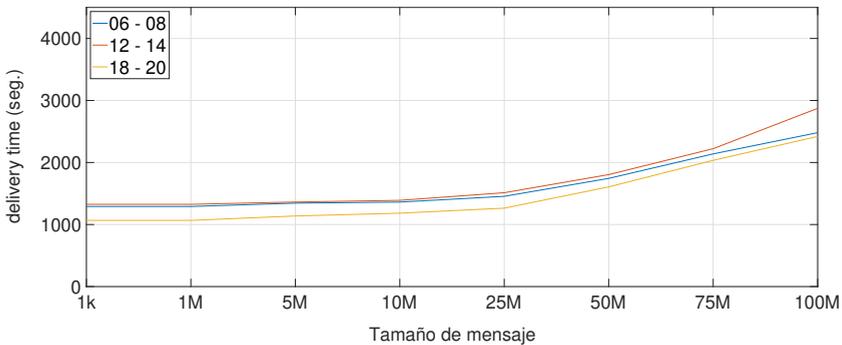


(c) Rango (18 - 20h)

Figura 5.15: Número de nodos con copia del mensaje dependiendo del rango horario en la ciudad de *San Francisco*.



(a) Epidemic



(b) EpidemicX2

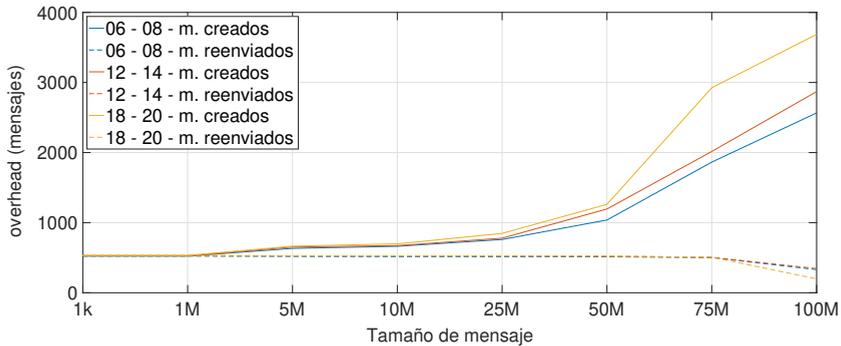
Figura 5.16: Delivery time de los mensajes en la ciudad de *San Francisco*.

5.5. Impacto de la Fragmentación de Mensaje

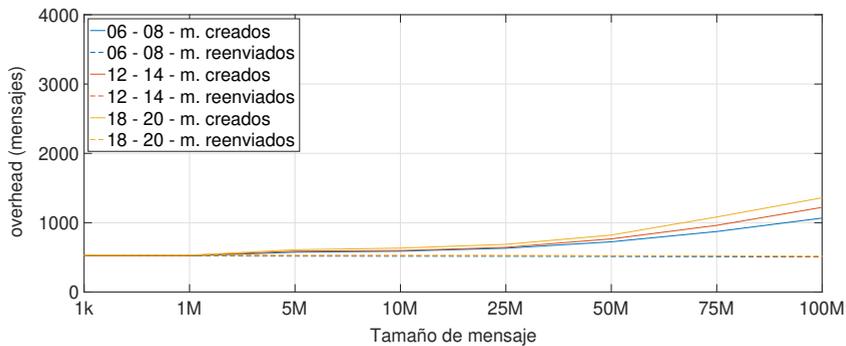
En la evaluación previa del protocolo *EpidemicX2*, se ha considerado la fragmentación del mensaje en dos partes, que son transmitidas desde dos nodos fijos. Ahora, estudiaremos el impacto de la fragmentación del mensaje original en mas partes, particularmente en cuatro y ocho fragmentos, a los que llamaremos *EpidemicX4* y *EpidemicX8*. Para ello hemos utilizado dos escenarios: el escenario de la *Plaza* con alta renovación, y el escenario de la *Estación* con media afluencia (14-15h).

En general, el rendimiento de los experimentos para los diferentes escenarios muestran que el delivery ratio incrementa cuando la fragmentación es alta, parti-

5. MEJORA DE LA DIFUSIÓN DE MENSAJES DE GRAN TAMAÑO



(a) Epidemic

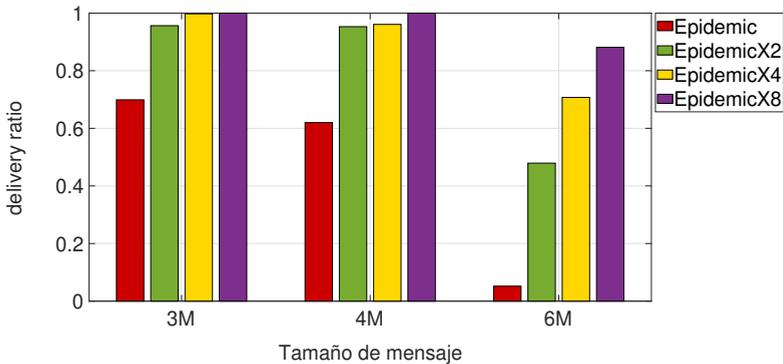


(b) EpidemicX2

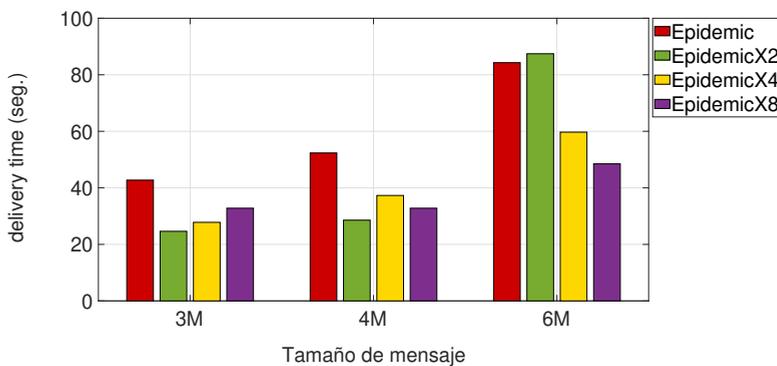
Figura 5.17: Overhead, mensajes creados y reenviados en la ciudad de *San Francisco*.

cularmente para los mensajes grandes. Como un ejemplo de estos experimentos, presentamos los resultados de los dos escenarios en las figuras 5.18 y 5.19. Podemos ver que el incremento más significativo del delivery ratio es de *Epidemic* a *EpidemicX2*; para *EpidemicX4* y *EpidemicX8* el aumento no es tan significativo en la mayoría de los casos. La única excepción es en el escenario de la Plaza, donde la figura 5.18a muestra que el delivery ratio para mensajes de 6MB se incrementa sustancialmente para *EpidemicX4*.

Sin embargo, el delivery time que se muestra en las figuras 5.18b y 5.19b, donde los experimentos muestran que, en general este tiempo se reduce ligeramente de *Epidemic* a *EpidemicX2*, pero para *EpidemicX4* y *EpidemicX8* no existe una



(a) Delivery ratio



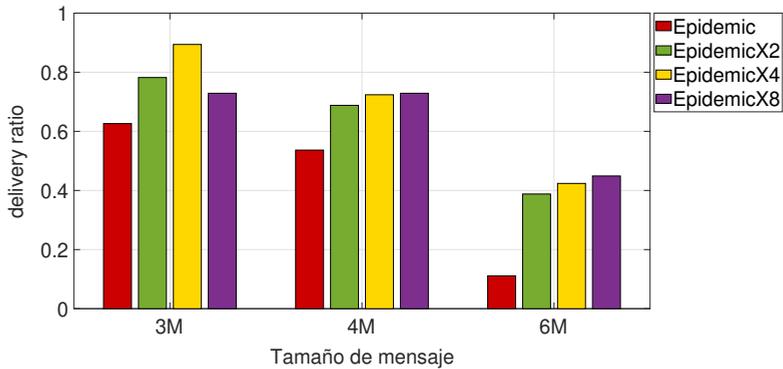
(b) Delivery time

Figura 5.18: Delivery ratio y delivery time en el escenario de la *Plaza* con alta renovación con diferentes estrategias de fragmentación de mensaje.

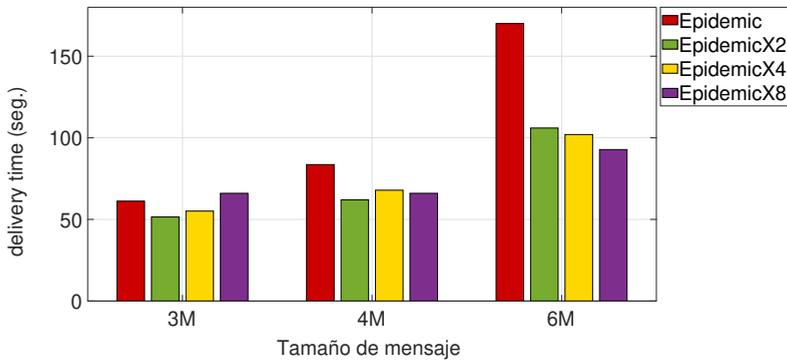
tendencia clara. Como el delivery time depende del delivery ratio, en algunos casos un incremento en la tasa de entrega puede producir un incremento en el tiempo que se tarda en recibir todas las partes del mensaje.

El overhead de *EpidemicX4* y *EpidemicX8*, como se espera, aumenta en un factor de casi dos y cuatro, respectivamente, comparado con el overhead de *EpidemicX2*. Por lo tanto, ya que el aumento de rendimiento de *EpidemicX4* y *EpidemicX8* no es sustancialmente superior al protocolo *EpidemicX2*, consideramos que *EpidemicX2* logra un buen equilibrio entre el rendimiento, eficacia y complejidad de implementación.

5. MEJORA DE LA DIFUSIÓN DE MENSAJES DE GRAN TAMAÑO



(a) Delivery ratio



(b) Delivery time

Figura 5.19: Delivery ratio y delivery time en el escenario de la *Estación* con media afluencia (14-15h) con diferentes estrategias de fragmentación de mensaje.

Finalmente, otro enfoque para la mejora de difusión sería colocar más nodos fijos. Sin embargo, ésta es una opción costosa, ya que se necesita implementar más infraestructura. Además, como los mensajes se transmitirían principalmente de nodos fijos a nodos móviles, no se explotará la red oportunista, que es el paradigma de red que utiliza esta tesis.

5.6. Conclusiones

Como hemos visto durante el desarrollo de esta tesis, la duración de los contactos es el aspecto más importante cuando validamos este tipo de redes. Cuando el tiempo de contacto es muy corto, los mensajes grandes no pueden ser transmitidos. Los resultados mostrados durante todo este capítulo, han sido obtenidos de los experimentos realizados con nuestro protocolo, el cual, ha sido diseñado especialmente para la transmisión de mensajes grandes, los cuales tienen menos posibilidades de llegar a su destino.

Hemos propuesto una mejora sobre el protocolo epidémico y su enfoque de diseminación, a la que hemos llamado *EpidemicX2*. La base de este protocolo es la relación entre la duración del contacto y el tiempo de transmisión del mensaje. Al dividir los mensajes grandes en dos partes, los nodos fijos ubicados para la diseminación, tienen más posibilidades de entregar estos mensajes, lo que se ve reflejado en los resultados, donde se ha logrado una importante mejora en la difusión.

EpidemicX2 incrementa el delivery ratio, y también reduce el delivery time. A pesar de que esto supone un incremento en el número de mensajes generados, si tomamos en consideración solo el número de bytes transmitidos, el overhead generado es menor al de otros protocolos que no ofrecen buenos resultados.

Capítulo 6

Conclusiones, Publicaciones y Trabajo Futuro

6.1. Conclusiones

El principal objetivo de esta tesis ha sido mejorar la disseminación de la información en Redes Oportunistas, especialmente en escenarios urbanos donde existen diferentes densidades y grados de renovación de personas y vehículos.

Las aportaciones claves de esta tesis son las siguientes:

- Estudio del Estado del Arte. Primeramente se aporta una revisión del estado del arte para entender el funcionamiento de las Redes Oportunistas. Se han analizado los trabajos ya existentes sobre Redes Oportunistas y sus usos en distintas áreas. Posteriormente se ha hecho una revisión de los principales protocolos de encaminamiento, las metodologías de evaluación, los modelos de movilidad y los modelos de tráfico de red para la generación de mensajes. Además, se describen las dos herramientas que fueron necesarias para el desarrollo de los experimentos y por ende de esta tesis.
- Nueva Metodología para Generación de Tráficos. Se ha introducido una metodología totalmente nueva para la generación de tráfico y de escenarios realistas. La principal razón para la creación de estos escenarios es la falta de disponibilidad de trazas reales, ya que el tipo de escenario es un aspecto

muy importante a la hora de evaluar una red oportunista. El escenario analizado es un factor crítico, ya que muchos aspectos espaciales y temporales no deben ser derivados de un escenario a otro. El enfoque de la creación de nuestros escenarios es totalmente nuevo, por lo que se han validado aspectos como la evolución temporal y espacial de los nodos, ratificando el enfoque utilizado en esta tesis doctoral. Los escenarios creados tienen diferentes grados de afluencia y renovación de personas, con lo que se ha conseguido recrear aspectos más realistas, ya que el número de personas en un lugar va cambiando a lo largo del día, aspecto que también se ha destacado en los escenarios vehiculares.

- Evaluación de los Protocolos de Enrutamiento. Considerando primeramente los escenarios peatonales, podemos ver que la renovación de personas y el número de nodos tienen un gran impacto en el rendimiento de la entrega de la información. Primero, en escenarios donde el número de nodos permanece constante (como en la plaza) al aumentar la tasa de renovación se reduce la difusión de mensajes. Esto es especialmente relevante con los mensajes grandes, donde la difusión es muy lenta. Adicionalmente, en escenarios donde el número de nodos es incremental (como en la estación), la difusión también se reduce. Respecto a la evaluación de rendimiento de los protocolos, excluyendo a Epidemic y PRoPHET, el delivery ratio de los protocolos de enrutamiento es muy similar en todos los escenarios. Sin embargo, tomando en consideración otros aspectos como el delivery time, los algoritmos de inundación controlada como Spray & Wait obtienen buenos resultados con una sobrecarga baja. Finalmente, centrándonos en los escenarios vehiculares, la diseminación de mensajes en la ciudad de Roma es menor si la comparamos con la difusión en la ciudad de San Francisco, esto se debe especialmente al tráfico o la densidad de estas ciudades, que influyen en la diseminación.
- Propuesta del Protocolo *EpidemicX2*. La duración de los contactos es el aspecto más importante cuando validamos este tipo de redes, ya que si el tiempo de contacto es muy corto, los mensajes grandes no pueden ser transmitidos. Se ha propuesto una mejora sobre el protocolo epidémico y su enfoque de diseminación, a la que llamamos *EpidemicX2*. La base de este protocolo es la relación entre la duración del contacto y el tiempo de transmisión del mensaje, dividiendo los mensajes en partes más pequeñas, aumentando las posibilidades de que estos mensajes sean entregados. Esto se ve claramente reflejado en los resultados, donde se ha logrado una mejora en la difusión, lo que se percibe en un aumento entre el 15% y 75% en el ratio de entrega, además de disminuir el tiempo de entrega, y reducir la sobrecarga en la red muy por debajo del protocolo epidémico.

6.2. Publicaciones

En esta sección se encuentran las publicaciones que han sido producidas como resultado de esta tesis.

6.2.1. Journal Internacional Indexado

- Evaluating and Enhancing Information Dissemination in Urban Areas of Interest using Opportunistic Networks. Chancay-Garcia, Leonardo; Manzoni, Pietro; Hernández-Orallo, Enrique; Calafate, Carlos Tavares; Cano, Juan-Carlos. En *IEEE Access* Vol. 6, 2018. (pp. 32515 - 32531). (JCR Q1).

Opportunistic Networks can provide an alternative way to support the diffusion of information in special locations within a city, particularly in crowded spaces where current wireless technologies can exhibit congestion issues. The efficiency of this diffusion relies mainly on user mobility. In fact, mobility creates the opportunities for contacts and, therefore, for data forwarding. This paper is therefore mainly focused on evaluating the dissemination of information in urban scenarios with different crowd densities and renewal rates. Through observation, we obtained real data from a local subway station and a plaza. These data were used, in combination with a pedestrian mobility simulator, to generate people mobility traces. We evaluated the diffusion of messages in these scenarios using the Direct and the Epidemic protocols. Experimental results show that content diffusion is mainly affected by two factors: degree of mobility and message size. Although it is well known that increasing the node density increases the diffusion rate, we show that, when keeping node density fixed, higher renewal rates cause the delivery ratio to drop. Moreover, we found that the relation between message size and contact duration is also a key factor, demonstrating that large messages can lead to a very low overall performance. Finally, with the aim of increasing the diffusion effectiveness of large messages, we propose an improvement over the Epidemic protocol, named *EpidemicX2*, based on the fragmentation of the data to be sent. The results show that the delivery ratio is increased, and the average delivery time is reduced, with no substantial increase in terms of overhead.

6.2.2. Congresos Internacionales

- Evaluation of Routing Protocols for Opportunistic Networks in Scenarios with High Degree of People Renewal. Chancay-Garcia, Leonardo; Herrera-Tapia, Jorge; Manzoni, Pietro; Hernández-Orallo, Enrique; Calafate, Carlos

Tavares; Cano, Juan-Carlos. Presentado en Mayo del 2018. En 32nd IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA), (pp. 228-235). **Core B**

The performance of Opportunistic Networks relies mainly on users mobility. It is in fact mobility that creates the opportunities for contacts and therefore for data forwarding. The evaluation of these networks is usually based on either synthetic mobility models or real mobility traces generally characterized by a fixed number of users. In this paper, we focus on a mostly unexplored area characterized by crowded scenarios with people renewal, i.e., with users that can either enter or leave the evaluated scenario. By using a pedestrian mobility simulator we define realistic people mobility traces that allow the evaluation of different degrees of users densities and renewal rates. Using this methodology, we studied the performance of various existing routing protocols in scenarios with high degree of people renewal and by varying the messages sizes. The experiments confirm that the renewal rate has an important impact on the performance of the protocols, which becomes particularly evident when the message size is large. Overall, we observe that controlled flooding algorithm such as Spray & Wait can obtain good packet delivery results with lower overhead than with respect to probability based protocols, avoiding also the implementation complexity of the latter.

- Information Dissemination using Opportunistic Networks in Scenarios with People Renewal. Chancay-Garcia, Leonardo; Manzoni, Pietro; Hernández-Orallo, Enrique; Calafate, Carlos Tavares; Cano, Juan-Carlos. Presentado en Junio del 2018. En 14th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), (pp. 1351-1356). **Core B**

The diffusion of information using Opportunistic Networks relies mainly on users mobility. In fact, mobility creates the opportunities for contacts and therefore for data forwarding. The evaluation of this process in crowded spaces with people renewal, i.e. with users that can either enter or leave the evaluated scenario, is still basically unexplored, despite being one of the most suitable areas of application for these networks. In this paper, we focus on evaluating the dissemination of information in a subway station. We obtained real data from a local subway station through observation. These data were used in a pedestrian mobility simulator to generate people mobility traces to be used in an Opportunistic Network simulator. The analysis of the temporal and spatial characteristics of these traces reflects the realism of the generated scenario. In the experiments, we compare the direct delivery and epidemic diffusion protocols. As expected, epidemic diffusion compared to direct delivery increases drastically the number of users that receive the

message. Furthermore, we propose an improvement of this protocol, called *EpidemicX2* that is particularly effective for large messages.

6.2.3. Congresos Nacionales (España)

- Chancay-Garcia, Leonardo; Manzoni, Pietro; Hernández-Orallo, Enrique; Calafate, Carlos Tavares; Cano, Juan-Carlos. P. (Septiembre, 2018). Evaluación de Protocolos de Encaminamiento para Redes Oportunistas en Escenarios con Alta Renovación de personas. En XXIX Jornadas de Paralelismo. Jornadas SARTECO 2018.

El rendimiento de las Redes Oportunistas depende principalmente de la movilidad de los usuarios. Esta movilidad crea oportunidades de contactos, y por lo tanto, de reenvío de mensajes. Generalmente la evaluación de estas redes está basada en modelos de movilidad sintéticos o en trazas reales, caracterizadas a menudo por un número fijo de usuarios. Este trabajo se centra en escenarios caracterizados por una renovación alta de personas. Utilizando un simulador de movilidad de peatones se han definido trazas realistas de movilidad con diferentes grados de densidad de usuarios y tasas de renovación. Usando esta metodología, se ha evaluado el rendimiento de varios protocolos de encaminamiento existentes, aplicados en escenarios con alto grado de renovación de personas y mensajes de diferentes tamaños. Los experimentos confirman que la tasa de renovación tiene un gran impacto en el rendimiento de los protocolos, siendo esto más evidente con mensajes de gran tamaño. De forma general, observamos que el algoritmo de inundación controlada (*controlled flooding*) como Spray & Wait puede obtener buenos resultados en la entrega de paquetes con una sobrecarga menor respecto a los protocolos basados en probabilidad, evitando también la complejidad de implementación de estos últimos.

6.3. Trabajo Futuro

En esta tesis doctoral, hemos investigado sobre varios aspectos claves de las Redes Oportunistas. Hemos visto como varios factores afectan al rendimiento de estas redes, y cómo estas redes pueden ser aplicadas en varios tipos de escenarios. Visto todo lo anterior, proponemos algunas mejoras para las Redes Oportunistas, que se plantean como trabajo futuro:

- **Escenarios:** Con la metodología presentada y utilizada en esta tesis se puede recrear cualquier tipo de escenario específico, con el objeto de estudiar la movilidad de los peatones. Por ello, se plantea seguir con la evaluación de otros escenarios, como por ejemplo: centros comerciales, museos, etc. con el objetivo de seguir evaluando el comportamiento de las redes oportunistas en un conjunto lo más amplio posible de escenarios.
- **Afluencia y Renovación:** Es muy importante definir nuevos algoritmos automatizados que puedan detectar automáticamente el grado de afluencia y renovación en la red, con el fin de determinar que tipo de protocolo utilizar para disminuir la latencia, aumentar el ratio de entrega de los mensajes y con la menor sobrecarga posible en la red.
- **Más Particiones:** Aunque hemos dedicado una sección para presentar las desventajas que podría acarrear mas particiones del mensaje, como trabajo futuro se debería implementar algoritmos que automáticamente dividan el mensaje en más partes asegurando que todos los bloques tengan la misma probabilidad de llegar a su destino.

Acrónimos

AP	Access Point
CDF	Cumulative Distribution Function
FSF	Friendship and Selfishness Forwarding Algorithm
FIFO	First In First Out
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MTU	Maximun Transfer Unit
ONE	Opportunistic Network Environment
OppNets	Opportunistic Networks
PoI	Point of Interest
RRS	Randomized Rumor Spreading
RWP	Random Way Point
RW	Random Walk
SDE	Stochastic Differential Equations

SLAW	Self-similar Least Action
SOLAR	Sociological Orbit models
SWIM	Small World In Motion
TLW	Truncated Levy Walk
TTL	Time To Live
TVC	Time Variant Community model
WiFi	Wireless Fidelity
WDM	Work Day Movement

Bibliografía

- [1] V. Autores. *Página Metro Valencia*. url<https://www.metrovalencia.es>. 2019 (vid. pág. 33).
- [2] F. Bai y A. Helmy. “A survey of mobility models”. En: *Wireless Adhoc Networks. University of Southern California, USA* 206 (2004), pág. 147 (vid. pág. 16).
- [3] N. Banerjee, M. D. Corner, D. Towsley y B. N. Levine. “Relays, base stations, and meshes: enhancing mobile networks with infrastructure”. En: *Proceedings of the 14th ACM international conference on Mobile computing and networking*. ACM. 2008, págs. 81-91 (vid. pág. 14).
- [4] M. Bastian, S. Heymann y M. Jacomy. “Gephi: An Open Source Software for Exploring and Manipulating Networks”. En: *Proceedings of the Third International Conference on Weblogs and Social Media, ICWSM 2009, San Jose, California, USA, May 17-20, 2009*. 2009 (vid. pág. 46).
- [5] M. Behrisch, L. Bieker, J. Erdmann y D. Krajzewicz. “SUMO—simulation of urban mobility: an overview”. En: *Proceedings of SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*. ThinkMind. 2011 (vid. pág. 23).
- [6] J. L. Berrou, J. Beecham, P. Quaglia, M. A. Kagarlis y A. Gerodimos. “Calibration and validation of the Legion simulation model using empiri-

- cal data”. En: *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005*. Springer, 2007, págs. 167-181 (vid. págs. 20, 23).
- [7] C. Bettstetter, C. Wagner y col. “The Spatial Node Distribution of the Random Waypoint Mobility Model.” En: *WMAN 11* (2002), págs. 41-58 (vid. pág. 18).
- [8] C. Boldrini y A. Passarella. “HCMM: Modelling spatial and temporal properties of human mobility driven by users social relationships”. En: *Computer Communications* 33.9 (2010), págs. 1056-1074 (vid. pág. 18).
- [9] L. Bracciale, M. Bonola, P. Loreti, G. Bianchi, R. Amici y A. Rabuffi. “CRAWDAD dataset roma/taxi (v. 2014-07-17)”. En: *CRAWDAD wireless network data archive* (2014) (vid. pág. 47).
- [10] J. Burgess, B. Gallagher, D. D. Jensen, B. N. Levine y col. “MaxProp: Routing for Vehicle-Based Disruption-Tolerant Networks.” En: *Infocom*. 2006 (vid. págs. 11, 25).
- [11] S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durst, K. Scott, K. Fall y H. Weiss. “RFC4838-Delay-tolerant networking architecture”. En: *RFC* (2007) (vid. pág. 24).
- [12] C. T. Calafate, G. Fortino, S. Fritsch, J. Monteiro, J.-C. Cano y P. Manzoni. “An Efficient and Robust Content Delivery Solution for IEEE 802.11P Vehicular Environments”. En: *J. Netw. Comput. Appl.* 35.2 (mar. de 2012), págs. 753-762 (vid. pág. 12).
- [13] T. Camp, J. Boleng y V. Davies. “A survey of mobility models for ad hoc network research”. En: *Wireless communications and mobile computing* 2.5 (2002), págs. 483-502 (vid. pág. 16).
- [14] A. Chaintreau, P. Hui, J. Crowcroft, C. Diot, R. Gass y J. Scott. “Impact of human mobility on opportunistic forwarding algorithms”. En: *IEEE Transactions on Mobile Computing* 6.6 (2007) (vid. pág. 7).
- [15] N. Chakchouk. “A survey on opportunistic routing in wireless communication networks”. En: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 17.4 (2015), págs. 2214-2241 (vid. pág. 8).

-
- [16] L. Chancay-García, E. Hernández-Orallo, P. Manzoni, C. T. Calafate y J.-C. Cano. “Evaluating and Enhancing Information Dissemination in Urban Areas of Interest using Opportunistic Networks”. En: *IEEE Access* (2018) (vid. págs. 3, 20).
- [17] U. of Dartmouth. *CRAWDAD: A Community Resource for Archiving Wireless Data* (vid. págs. 14, 17).
- [18] C. S. De Abreu y R. M. Salles. “Modeling message diffusion in epidemical DTN”. En: *Ad Hoc Networks* 16 (2014), págs. 197-209 (vid. pág. 14).
- [19] J. Dede, A. Förster, E. Hernández-Orallo y col. “Simulating Opportunistic Networks: Survey and Future Directions”. En: *IEEE Communications Surveys and Tutorials* PP.– (2017) (vid. pág. 2).
- [20] N. Eagle y A. Pentland. “Social serendipity: Mobilizing social software”. En: *IEEE Pervasive Computing* 2 (2005), págs. 28-34 (vid. pág. 17).
- [21] F. Ekman, A. Keränen, J. Karvo y J. Ott. “Working day movement model”. En: *Proceedings of the 1st ACM SIGMOBILE workshop on Mobility models*. ACM. 2008, págs. 33-40 (vid. pág. 18).
- [22] F. Ekman, A. Keränen, J. Karvo y J. Ott. “Working day movement model”. En: *Proceeding of the 1st ACM SIGMOBILE workshop on Mobility models - MobilityModels '08* (2008), págs. 33-40 (vid. pág. 18).
- [23] K. Fall. “A delay-tolerant network architecture for challenged internets”. En: *Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*. ACM. 2003, págs. 27-34 (vid. pág. 24).
- [24] T. M. J. Fruchterman y E. M. Reingold. “Graph drawing by forcedirected placement”. En: *Software-Practice And Experience* 21.11 (1991), págs. 1129-1164 (vid. pág. 46).
- [25] S. Gaito, E. Pagani y G. P. Rossi. “Fine-grained tracking of human mobility in dense scenarios”. En: *Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks Workshops, 2009. SECON Workshops' 09. 6th Annual IEEE Communications Society Conference on*. IEEE. 2009, págs. 1-3 (vid. pág. 17).

- [26] J. Ghosh, S. J. Philip y C. Qiao. “Sociological orbit aware location approximation and routing (SOLAR) in MANET”. En: *Ad Hoc Networks* 5.2 (2007), págs. 189-209 (vid. pág. 18).
- [27] C. Gloor. *PEDSIM - Pedestrian Crowd Simulation*. url<http://pedsim.silmaril.org>. 2016 (vid. págs. 2, 21).
- [28] R. Groenevelt, P. Nain y G. Koole. “The message delay in mobile ad hoc networks”. En: *Performance Evaluation* 62.1-4 (2005), págs. 210-228 (vid. pág. 14).
- [29] M. Grossglauser y D. Tse. “Mobility increases the capacity of ad-hoc wireless networks”. En: *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*. Vol. 3. IEEE. 2001, págs. 1360-1369 (vid. págs. 7, 9).
- [30] Z. J. Haas y T. Small. “A new networking model for biological applications of ad hoc sensor networks”. En: *IEEE/ACM Transactions on Networking* 14.1 (2006), págs. 27-40 (vid. pág. 14).
- [31] D. Helbing y P. Molnár. “Social force model for pedestrian dynamics”. En: *Phys. Rev. E* 51.5 (1995), págs. 4282-4286 (vid. págs. 23, 32).
- [32] Ó. Helgason, S. T. Kouyoumdjieva y G. Karlsson. “Opportunistic Communication and Human Mobility”. En: *IEEE Transactions on Mobile Computing* 13.7 (2014), págs. 1597-1610 (vid. págs. 7, 20).
- [33] E. Hernández-Orallo, J. C. Cano, C. T. Calafate y P. Manzoni. “New approaches for characterizing inter-contact times in opportunistic networks”. En: *Ad Hoc Networks* 52 (2016), págs. 160-172 (vid. pág. 17).
- [34] E. Hernández-Orallo, M. Murillo-Arcila, C. T. Calafate, J. C. Cano, J. A. Conejero y P. Manzoni. “Analytical evaluation of the performance of contact-Based messaging applications”. En: *Computer Networks* 111 (2016), págs. 45-54 (vid. pág. 14).
- [35] E. Hernandez-Orallo, M. D. S. Olmos, J.-C. Cano, C. T. Calafate y P. Manzoni. “CoCoWa: A collaborative contact-based watchdog for detecting

-
- selfish nodes”. En: *IEEE transactions on Mobile Computing* 14.6 (2015), págs. 1162-1175 (vid. pág. 14).
- [36] J. Herrera-Tapia, A. Förster, E. Hernández-Orallo, A. Udugama, A. Tomas y P. Manzoni. “Mobility as the Main Enabler of Opportunistic Data Dissemination in Urban Scenarios”. En: *Proceedings of the 16th International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless, AdHocNow 2017*. Springer International Publishing, 2017, págs. 107-120 (vid. pág. 7).
- [37] J. Herrera-Tapia, E. Hernández-Orallo, A. Tomás, P. Manzoni, C. Tavares Calafate y J.-C. Cano. “Friendly-Sharing: Improving the Performance of City Sensing through Contact-Based Messaging Applications”. En: *Sensors* 16.9 (2016), pág. 1523 (vid. págs. 8, 62).
- [38] W.-J. Hsu, T. Spyropoulos, K. Psounis y A. Helmy. “Modeling time-variant user mobility in wireless mobile networks”. En: *INFOCOM 2007. 26th IEEE international conference on computer communications*. IEEE. IEEE. 2007, págs. 758-766 (vid. pág. 18).
- [39] C.-M. Huang, K.-c. Lan y C.-Z. Tsai. “A survey of opportunistic networks”. En: *Advanced Information Networking and Applications-Workshops, 2008. AINAW 2008. 22nd International Conference on*. IEEE. 2008, págs. 1672-1677 (vid. págs. 1, 7).
- [40] P. Hui, A. Chaintreau, J. Scott, R. Gass, J. Crowcroft y C. Diot. “Pocket switched networks and human mobility in conference environments”. En: *Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*. ACM. 2005, págs. 244-251 (vid. pág. 17).
- [41] P. Hui, J. Crowcroft y E. Yoneki. “Bubble rap: Social-based forwarding in delay-tolerant networks”. En: *IEEE Transactions on Mobile Computing* 10.11 (2011), págs. 1576-1589 (vid. pág. 11).
- [42] W. D. Ivancic. “Security analysis of DTN architecture and bundle protocol specification for space-based networks”. En: *2010 IEEE Aerospace Conference*. IEEE. 2010, págs. 1-12 (vid. pág. 24).
- [43] S. Jain, M. Demmer, R. Patra y K. Fall. “Using Redundancy to Cope with Failures in a Delay Tolerant Network”. En: *Proceedings of the 2005 Confe-*

- rence on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. SIGCOMM '05. New York, NY, USA: ACM, 2005, págs. 109-120 (vid. pág. 12).
- [44] S. Jain, K. Fall y R. Patra. *Routing in a delay tolerant network*. Vol. 34. 4. ACM, 2004 (vid. págs. 9, 25).
- [45] M. Karaliopoulos. “Assessing the vulnerability of DTN data relaying schemes to node selfishness”. En: *IEEE Communications Letters* 13.12 (2009) (vid. pág. 14).
- [46] R. Karp, C. Schindelhauer, S. Shenker y B. Vocking. “Randomized rumor spreading”. En: *Foundations of Computer Science, 2000. Proceedings. 41st Annual Symposium on*. IEEE. 2000, págs. 565-574 (vid. pág. 11).
- [47] J. Karvo y J. Ott. “Time scales and delay-tolerant routing protocols”. En: *Proceedings of the third ACM workshop on Challenged networks*. ACM. 2008, págs. 33-40 (vid. pág. 11).
- [48] A. Keränen, J. Ott y T. Kärkkäinen. “The ONE simulator for DTN protocol evaluation”. En: *Proceedings of the 2nd international conference on simulation tools and techniques*. 2009, pág. 55 (vid. págs. 2, 9, 23).
- [49] K. Lee, S. Hong, S. J. Kim, I. Rhee y S. Chong. “SLAW: A New Mobility Model for Human Walks”. En: *INFOCOM 2009, IEEE*. 2009, págs. 855 -863 (vid. pág. 18).
- [50] J. Leguay, A. Lindgren, J. Scott, T. Friedman y J. Crowcroft. “Opportunistic content distribution in an urban setting”. En: *Proceedings of the 2006 SIGCOMM workshop on Challenged networks*. ACM. 2006, págs. 205-212 (vid. pág. 17).
- [51] A. Lindgren, E. Davies, S. Grasic y A. Doria. “Probabilistic routing protocol for intermittently connected networks”. En: (2012) (vid. págs. 11, 25).
- [52] A. Lindgren, A. Doria y O. Schelén. “Probabilistic routing in intermittently connected networks”. En: *ACM SIGMOBILE mobile computing and communications review* 7.3 (2003), págs. 19-20 (vid. pág. 10).

-
- [53] A. Lindgren, A. Doria y O. Schelen. “Probabilistic routing in intermittently connected networks”. En: *Service assurance with partial and intermittent resources*. Springer, 2004, págs. 239-254 (vid. pág. 25).
- [54] A. Mei y J. Stefa. “SWIM: A Simple Model to Generate Small Mobile Worlds”. En: *INFOCOM 2009, IEEE*. 2009, págs. 2106-2113 (vid. pág. 18).
- [55] A. Mei y J. Stefa. “SWIM: A simple model to generate small mobile worlds”. En: *INFOCOM 2009, IEEE*. IEEE. 2009, págs. 2106-2113 (vid. pág. 18).
- [56] A. Munjal, T. Camp y W. C. Navidi. “SMOOTH: a simple way to model human mobility”. En: *Proceedings of the 14th ACM international conference on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*. ACM. 2011, págs. 351-360 (vid. pág. 18).
- [57] A. Munjal, W. C. Navidi y T. Camp. “Steady-state of the SLAW mobility model”. En: *Journal of Communications* 9.4 (2014), págs. 322-331 (vid. pág. 18).
- [58] J. Niu, J. Guo, Q. Cai, N. Sadeh y S. Guo. “Predict and spread: An efficient routing algorithm for opportunistic networking”. En: *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2011 IEEE*. IEEE. 2011, págs. 498-503 (vid. pág. 10).
- [59] L. Pajevic y G. Karlsson. “Characterizing opportunistic communication with churn for crowd-counting”. En: *2015 IEEE 16th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*. 2015, págs. 1-6 (vid. págs. 20, 21).
- [60] A. Passarella y M. Conti. “Characterising aggregate inter-contact times in heterogeneous opportunistic networks”. En: *International Conference on Research in Networking*. Springer. 2011, págs. 301-313 (vid. pág. 17).
- [61] L. Pelusi, A. Passarella y M. Conti. “Opportunistic networking: data forwarding in disconnected mobile ad hoc networks”. En: *IEEE communications Magazine* 44.11 (2006) (vid. págs. 1, 7, 8).
- [62] M Piorkowski, N Sarafijanovic-Djukic y M Grossglauser. *CRAWDAD data set epfl/mobility (v. 2009-02-24), Feb. 2009* (vid. pág. 47).

- [63] B Poonguzharselvi y V Vetriselvi. “Survey on routing algorithms in opportunistic networks”. En: *Computer Communication and Informatics (ICCCI), 2013 International Conference on*. IEEE. 2013, págs. 1-5 (vid. pág. 8).
- [64] R. Ramanathan, R. Hansen, P. Basu, R. Rosales-Hain y R. Krishnan. “Prioritized epidemic routing for opportunistic networks”. En: *Proceedings of the 1st international MobiSys workshop on Mobile opportunistic networking*. ACM. 2007, págs. 62-66 (vid. pág. 10).
- [65] I. Rhee, M. Shin, S. Hong, K. Lee, S. J. Kim y S. Chong. “On the levy-walk nature of human mobility”. En: *IEEE/ACM transactions on networking (TON)* 19.3 (2011), págs. 630-643 (vid. pág. 18).
- [66] N. Ristanovic, G. Theodorakopoulos y J.-Y. Le Boudec. “Traps and pitfalls of using contact traces in performance studies of opportunistic networks”. En: *INFOCOM, 2012 Proceedings IEEE*. Ieee. 2012, págs. 1377-1385 (vid. pág. 14).
- [67] G. Sandulescu y S. Nadjm-Tehrani. “Optimising Replication versus Redundancy in Window-aware Opportunistic Routing”. En: *2010 Third International Conference on Communication Theory, Reliability, and Quality of Service*. IEEE. 2010, págs. 192-201 (vid. pág. 12).
- [68] K. Scott y S. Burleigh. *Bundle protocol specification*. Inf. téc. 2007 (vid. pág. 24).
- [69] F. A. Silva, C. Celes, A. Boukerche, L. B. Ruiz y A. A. Loureiro. “Filling the gaps of vehicular mobility traces”. En: *Proceedings of the 18th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. ACM. 2015, págs. 47-54 (vid. pág. 18).
- [70] C. Souza, E. Mota, L. Galvao, P. Manzoni, J. C. Cano y C. T. Calafate. “Fsf: Friendship and selfishness forwarding for delay tolerant networks”. En: *Computers and Communication (ISCC), 2016 IEEE Symposium on*. IEEE. 2016, págs. 1200-1207 (vid. pág. 12).
- [71] T. Spyropoulos y A. Picu. “Opportunistic Routing”. En: *Mobile Ad Hoc Networking*. John Wiley & Sons, Ltd, 2013. Cap. 11, págs. 419-452. ISBN: 9781118511305. DOI: 10 . 1002 / 9781118511305 . ch11. eprint: <https://>

-
- onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781118511305.ch11 (vid. pág. 8).
- [72] T. Spyropoulos, K. Psounis y C. S. Raghavendra. “Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks”. En: *Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*. ACM. 2005, págs. 252-259 (vid. págs. 10, 25).
- [73] T. Spyropoulos, K. Psounis y C. S. Raghavendra. “Efficient routing in intermittently connected mobile networks: The multiple-copy case”. En: *IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN)* 16.1 (2008), págs. 77-90 (vid. págs. 14, 25).
- [74] S. M. Tornell, C. M. T. Calafate, J.-C. Cano y P. Manzoni. “DTN Protocols for Vehicular Networks: An Application Oriented Overview.” En: *IEEE Communications Surveys and Tutorials* 17.2 (2015), págs. 868-887 (vid. pág. 8).
- [75] T. C. Tsai y H. H. Chan. “NCCU Trace: Social-network-aware mobility trace”. En: *IEEE Communications Magazine* 53.10 (2015), págs. 144-149. ISSN: 01636804. DOI: 10.1109/MCOM.2015.7295476 (vid. págs. 17, 18).
- [76] A. Vahdat, D. Becker y col. *Epidemic routing for partially connected ad hoc networks*. Inf. téc. Duke University, 2000 (vid. págs. 10, 25).
- [77] V. Vukadinović, Ó. R. Helgason y G. Karlsson. “An analytical model for pedestrian content distribution in a grid of streets”. En: *Mathematical and Computer Modelling* 57.11-12 (2013), págs. 2933 -2944 (vid. págs. 18, 21).
- [78] V. Vukadinovic y S. Mangold. “Opportunistic wireless communication in theme parks: a study of visitors mobility”. En: *Proceedings of the 6th ACM workshop on Challenged networks*. ACM. 2011, págs. 3-8 (vid. pág. 14).
- [79] K. Wehrle, M. Günes y J. Gross. *Modeling and tools for network simulation*. Springer Science & Business Media, 2010 (vid. pág. 20).
- [80] J. Whitbeck, V. Conan y M. D. de Amorim. “Performance of opportunistic epidemic routing on edge-markovian dynamic graphs”. En: *IEEE Transactions on communications* 59.5 (2011), págs. 1259-1263 (vid. pág. 14).

- [81] J. Widmer y J.-Y. Le Boudec. “Network Coding for Efficient Communication in Extreme Networks”. En: *Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-tolerant Networking*. WDTN '05. New York, NY, USA: ACM, 2005, págs. 284-291 (vid. pág. 12).
- [82] Q. Xu, Z. Su, K. Zhang, P. Ren y X. S. Shen. “Epidemic information dissemination in mobile social networks with opportunistic links”. En: *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing* 3.3 (2015), págs. 399-409 (vid. pág. 14).
- [83] S. Yang, X. Yang, C. Zhang y E. Spyrou. “Using social network theory for modeling human mobility”. En: *IEEE network* 24.5 (2010) (vid. pág. 18).
- [84] X. Zhang, G. Neglia, J. Kurose y D. Towsley. “Performance modeling of epidemic routing”. En: *Computer Networks* 51.10 (2007), págs. 2867-2891 (vid. pág. 14).
- [85] Y. Zhang y J. Zhao. “Social Network Analysis on Data Diffusion in Delay Tolerant Networks”. En: *Proceedings of the Tenth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. MobiHoc '09. New York, NY, USA: ACM, 2009, págs. 345-346 (vid. pág. 8).
- [86] H. Zhu y M. Li. “Dealing with vehicular traces”. En: *Studies on Urban Vehicular Ad-hoc Networks*. Springer, 2013, págs. 15-21 (vid. pág. 17).