



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones

**Estudio de modelos de movilidad realistas usando
métricas de teoría de grafos y su impacto en redes
inalámbricas de malla**

*Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones.*

Autores:

Pablo Felipe Avilés Parra
C.I: 010532353-9
feshiaviles@live.com

Josue David Pinto Nieto
C.I: 030229508-4
darkytanatos@gmail.com

Director:

Ing. Andrés Marcelo Vázquez Rodas, PhD
C.I: 030149684-0

Codirector:

Ing. Darwin Fabián Astudillo Salinas, PhD
C.I: 010390703-6

**Cuenca - Ecuador
1 de abril del 2021**



Resumen

Las redes inalámbricas de malla, **Wireless Mesh Networks (WMNs)**, son redes con la capacidad de auto-formarse, auto-configurarse y auto-repararse. Estas características fueron heredadas de las redes móviles ad-hoc, **Mobile Ad-Hoc Networks (MANETs)**. Sin embargo, las **WMNs** surgen como alternativa al uso de las **MANETs** debido a sus diferencias en arquitectura y tecnologías de radio utilizadas. Dentro de las **WMNs** destacan tres paradigmas de arquitectura: **WMNs** con infraestructura, **WMNs** clientes y **WMNs** híbridas (como la combinación de las dos arquitecturas anteriores). Además, las **WMNs**, al poseer tecnologías de radio basadas en el estándar 802.11, resultan más convenientes que las **MANETs** para el enrutamiento de información hacia Internet. Tanto las **MANETs** como las **WMNs** hacen uso de enrutadores de malla, **Mesh Routers (MRs)**, para el enrutamiento de la información.

El gran número de dispositivos móviles introducidos en los últimos años ha obligado a crear nuevas arquitecturas topológicas sobre la base de las **WMNs**. Un claro ejemplo de arquitecturas modernas es la denominada **WMN** espontánea. Este tipo de arquitectura se caracteriza por estar conformada únicamente por dispositivos móviles o nodos finales de usuario. Dentro de este tipo de arquitectura, la característica principal es que todos los nodos actúan simultáneamente tanto como dispositivos de interfaz de usuario así como enrutadores de tráfico de sus pares. Sin embargo, con el fin de optimizar y hacer más eficiente la operación de la red, a través de técnicas de control de topologías, se puede seleccionar solo cierta cantidad de dispositivos para que actúen como los enrutadores de la red. Este proceso de selección clasifica a los nodos en dos grupos: los **MRs** y los nodos clientes de la red en malla, **Mesh Clients (MCs)**. Así, el enrutamiento del tráfico estará controlado únicamente por los **MRs**, mientras que los **MCs** actuarán únicamente como dispositivos de usuario final.

Estudios como [1, 2] han demostrado mejoras en el desempeño de redes **WMNs** espontáneas, por medio del uso de control de topologías. Esta técnica se llevó a cabo mediante la combinación de dos métricas de teoría de grafos, la centralidad de intermediación (betweenness centrality) y la modularidad. Estas dos métricas fueron utilizadas para abstraer la información de la topología de las redes de malla cliente, con el fin de seleccionar como enrutadores solamente a los nodos más importantes de la red. Mediante este control de topología, se alcanzan mejoras significativas en la eficiencia general de la red con respecto a una red en la que todos los dispositivos actúan como enrutadores.

Por otra parte, es importante recalcar que al estar conformada por dispositivos finales de usuario, las **WMNs** espontáneas generan escenarios dinámicos dentro de su topología. Esta topología cambia constantemente conforme los usuarios se mueven de un lugar a otro. Por tal motivo, se han establecido en la literatura modelos matemáticos que intentan emular, de la manera más realista posible, el comportamiento dinámico de los nodos sobre la red. A estos modelos se los ha denominado modelos de movilidad. En un estudio previo [2], estos modelos de movilidad realistas han sido objeto de evaluación desde la perspectiva de un control de topología eficiente.

Bajo estas premisas, el objetivo principal de este trabajo es el de encontrar y caracterizar las diferencias

topológicas dentro de seis modelos de movilidad realistas disponibles en la literatura y aplicados a la evaluación de redes inalámbricas de malla. Estas diferencias se establecieron mediante el uso de seis métricas distintas de teoría de grafos. Haciendo uso del concepto de [WMNs](#) espontáneas, se simularon y evaluaron redes en las que las topologías cambiaban de acuerdo al modelo de movilidad escogido. Al final, se establecieron conclusiones que indicaban cuáles modelos de movilidad presentaban resultados más relevantes dentro de cada métrica.

Adicionalmente, para ilustrar un ejemplo de aplicación de los análisis realizados a los modelos de movilidad, se utilizaron los conceptos de integridad y robustez de red. Para esto, se analizaron dos modelos de movilidad sobre cada métrica. En cada modelo se eliminaron nodos simulando un ataque de red, con el objetivo de evaluar el impacto sobre la tasa de entrega de paquetes, [Packet Delivery Ratio \(PDR\)](#), resultante cada vez que un nodo fuera eliminado. Se pudo observar que no todas las métricas entregaron resultados satisfactorios, por lo que se descartó la aplicación de robustez de red basada en estas métricas específicamente. Complementariamente, para estas métricas se hizo un análisis de [PDR](#) y retardo simulando redes con una estructura topológica basada en comunidades. Finalmente, se establecieron conclusiones sobre cada modelo de movilidad y cada métrica, indicando los resultados más relevantes obtenidos sobre cada uno.

Este trabajo ha sido realizado mediante distintas herramientas de software de libre acceso muy difundidas en la comunidad científica. Para las trazas de movilidad se ha ocupado [BonnMotion \(BM\)](#) y [Simulation Of Urban Mobility \(SUMO\)](#). Para la simulación de las WMNs con tráfico de información se ha utilizado el simulador de red de eventos discretos [Network Simulator 3 \(NS-3\)](#). Las métricas de teoría de grafos han sido obtenidas mediante el software Gephi. Finalmente, las comparativas entre los modelos de movilidad y métricas utilizadas, se han obtenido mediante la plataforma Python.

Palabras clave : Redes inalámbricas de malla. Telecomunicaciones. Modelos de movilidad realistas. Métricas de teoría de grafos. Integridad y robustez de red. NS-3.



Abstract

Wireless mesh networks, **WMNs**, are networks with the ability to self-form, self-configure, and self-repair. These features were inherited from the ad-hoc mobile networks, **MANETs**. However, **WMNs** appear as an alternative to the use of **MANETs** due to their differences in architecture and radio technologies used. Within **WMNs**, three paradigms of architecture stand out: **WMNs** with infrastructure, **WMNs** clients and **WMNs** hybrid (as the combination of the two previous architectures). Furthermore, **WMNs**, having radio technologies based on the 802.11 standard, are more convenient than the **MANETs** for routing information to the Internet. Both **MANETs** and **WMNs** make use of mesh routers, **MRs**, for routing information.

The large number of mobile devices introduced in recent years has forced the creation of new topological architectures based on **WMNs**. A clear example of modern architectures is the so-called **WMN** spontaneous. This type of architecture is characterized by being made up only of mobile devices or end user nodes. Within this type of architecture. The main characteristic is that all nodes act simultaneously both as user interface devices as well as traffic routers for their peers. However, in order to optimize and make more efficient the operation of the network. through topology control techniques, only a certain number of devices can be selected to act as the network routers. This selection process classifies the nodes into two groups: the **MRs** and the client nodes of the mesh network **MCs**. Thus, the routing of the traffic will be controlled only by the **MRs**. While the **MCs** will only act as end-user devices

Studies such as [1, 2] have shown improvements in the performance of spontaneous **WMNs** networks, through the use of topology control. This technique was carried out by combining two graph theory metrics, betweenness centrality, and modularity. These two metrics were used to abstract the information from the topology of the client mesh networks. In order to select only the most important nodes in the network as routers. Through this topology control significant improvements in overall network efficiency are achieved over a network in which all devices act as routers.

On the other hand, it is important to emphasize that being made up of end user devices, spontaneous **WMNs** generate dynamic scenarios within their topology. This topology is constantly changing as users move from one location to another. For this reason, mathematical models have been established in the literature that attempt to emulate, in the most realistic way possible, the dynamic behavior of nodes on the network. These models have been called mobility models. In a previous study [2], these realistic mobility models have been evaluated from the perspective of efficient topology control.

Under these premises, the main objective of this work is to find and characterize the topological differences within six realistic mobility models available in the literature and applied to the evaluation of wireless mesh networks. These differences were established using six different graph theory metrics. Using the concept of spontaneous **WMNs**, networks were simulated and evaluated in which the topologies changed according to the chosen mobility model. In the end, conclusions were established that indicated which mobility models presented the most relevant results within each metric.

Additionally, to illustrate an example of application of the analyzes carried out to mobility models. The concepts of network integrity and robustness were used. For this, two mobility models were analyzed on each metric. In each model, nodes were eliminated simulating a network attack. In order to evaluate the impact on the packet delivery rate, [PDR](#), resulting each time a node was eliminated. It could be observed that not all the metrics delivered satisfactory results, so the application of network robustness based on these metrics specifically was discarded. Complementarily, for these metrics an analysis of [PDR](#) and delay was made simulating networks with a topological structure based on communities. Finally, conclusions were established on each mobility model and each metric. Also, it was indicated the most relevant results obtained on each one.

This work has been carried out using different open access software tools widely used in the scientific community. For the mobility traces, [BM](#) and [SUMO](#) have been used. For the simulation of the WMNs with information traffic, the discrete event network simulator [NS-3](#) has been used. The graph theory metrics have been obtained using Gephi software. Lastly, the comparisons between the mobility models and the metrics have been obtained using the Python platform.

Keywords : Wireless mesh networks. Telecommunications. Realistic mobility models. Graph theory metrics. Network integrity. Network robustness. NS-3.



Índice general

Resumen	I
Abstract	III
Índice general	V
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	XI
Cláusula de Propiedad Intelectual	XIII
Cláusula de Propiedad Intelectual	XIV
Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional	XV
Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional	XVI
Certifico	XVII
Certifico	XVIII
Dedicatoria	XIX
Dedicatoria	XX
Agradecimientos	XXI
Abreviaciones y acrónimos	XXII
1. Introducción	1
1.1. Identificación del problema	1
1.2. Justificación	2
1.3. Alcance	3
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	3



2. Marco teórico	4
2.1. Redes Inalámbricas de Malla	4
2.2. Modelos de Movilidad	5
2.2.1. Caminata de Levy	6
2.2.2. Modelo de movilidad Small World In Motion (SWIM)	6
2.2.3. Modelo de movilidad SMOOTH	7
2.2.4. Modelo de movilidad Self-Similar Least Action Walk (SLAW)	8
2.2.5. Modelo de movilidad área de desastre	10
2.2.6. Modelo de movilidad con restricciones geográficas	11
2.2.7. Modelo de movilidad RWP	12
2.3. Métricas de teoría de Grafos	12
2.3.1. Centralidad de Grado	13
2.3.2. Centralidad de Intermediación	14
2.3.3. Centralidad de Cercanía	16
2.3.4. Centralidad de Vector Propio	17
2.3.5. Coeficiente de Agrupamiento	19
2.3.6. Excentricidad	20
2.4. Modularidad	22
2.5. Robustez de red	23
2.6. Aplicaciones en redes en malla	27
3. Trabajos Relacionados	28
4. Metodología	31
4.1. Obtención de las métricas de teoría de grafos	31
4.1.1. Generación de las trazas de movilidad usando modelos sintéticos	31
4.1.1.1. Escenario SWIM	32
4.1.1.2. Escenario SMOOTH	32
4.1.1.3. Escenario SLAW	32
4.1.1.4. Escenario restricciones geográficas	33
4.1.1.5. Escenario área de desastre	34
4.1.1.6. Escenario RWP	35
4.1.2. Obtención de la matriz de Adyacencia y matriz de Costes	36
4.1.3. Obtención de métricas de teoría de grafos	39
4.2. Evaluación del desempeño de la red	41
4.2.1. Obtención de trazas para pruebas de robustez	41
4.2.2. Configuración de los nodos y generación de flujos de tráfico	42
4.2.3. Simulación de tráfico de datos en la red	42
4.2.4. Análisis de clusters de servidores en las redes inalámbricas en malla	43
5. Resultados	46
5.1. Análisis del impacto de los modelos de movilidad empleando métricas de teoría de grafos . . .	46
5.1.1. Análisis de modelos de movilidad basados en la métrica de grado	46
5.1.2. Análisis basado en la métrica de Centralidad de Intermediación	51



5.1.3.	Análisis basado en la métrica de Coeficiente de Agrupamiento	58
5.1.4.	Análisis basado en la métrica de Centralidad de Cercanía	62
5.1.5.	Análisis basado en la métrica de Centralidad de Vector Propio	65
5.1.6.	Análisis basado en la métrica de Excentricidad	68
5.1.7.	Análisis basado en la métrica de Modularidad	72
5.1.8.	Resumen	76
5.2.	Análisis del desempeño de red	77
5.2.1.	Impacto de la métrica de Centralidad de Grado en las redes en Malla	78
5.2.2.	Impacto de la métrica de Centralidad de Intermediación en las redes en Malla	80
5.2.3.	Impacto de la métrica de Centralidad de Cercanía en las redes en Malla	81
5.2.4.	Impacto de la métrica de Excentricidad en las redes en Malla	82
5.2.5.	Impacto de la métrica de vector propio en las redes en Malla	84
5.2.6.	Impacto de la métrica de coeficiente de agrupamiento en las redes en Malla	85
6.	Conclusiones y Recomendaciones	87
6.1.	Conclusiones	87
6.2.	Trabajos futuros	90
A.		91
B.	Algoritmos	94
B.1.	Código para la obtención de las matrices de adyacencia y costes	94
B.2.	Generación de archivos Pajek.net	106
B.3.	Script para automatizar el proceso en NS-3 (actualizarMain.sh)	110
B.4.	Script principal en ns-3 que incluye tráfico de red (main.cc)	112
B.5.	Script para automatizar la actualización de trazas (actualizarNodos.sh)	119
B.6.	Script para automatizar la obtención de resultados (obtenerPDR.sh)	120
	Bibliografía	121



Índice de figuras

2.1. Figura tomada como ejemplo de [2]. Esta figura especifica el comportamiento del parámetro α cuando se acerca a 1 (a) y cuando se acerca a 0 (b).	7
2.2. Desplazamiento de un nodo de acuerdo al modelo de movilidad SLAW. El nodo cruza a través de cuatro puntos de referencia distintos.	10
2.3. Grafo generado para demostrar la centralidad de grado. La diferencia de tamaños y colores en cada nodo indica el grado de relevancia para la red.	13
2.4. Ejemplo de la métrica de grado a una escala más compleja.	14
2.5. Grafo generado para representar la métrica de intermediación.	15
2.6. Grafo con la misma densidad de nodos que la Figura 2.5. Pero en este caso los nodos poseen una mayor cantidad de enlaces.	15
2.7. Ejemplo de la métrica de centralidad de intermediación a una escala más compleja.	16
2.8. Grafo generado para ilustrar la métrica de cercanía.	17
2.9. Ejemplo de la métrica de centralidad de cercanía a una escala más compleja.	17
2.10. Grafo generado para representar la métrica de vector propio.	18
2.11. Ejemplo de la métrica de centralidad de vector propio a una escala más compleja.	19
2.12. Grafo generado para representar la métrica de coeficiente de agrupamiento.	19
2.13. Ejemplo de la métrica de coeficiente de agrupamiento a una escala más compleja.	20
2.14. Grafo generado para representar la métrica de excentricidad.	21
2.15. Ejemplo de la métrica de excentricidad a una escala más compleja.	21
2.16. Red de ejemplo que indica la cantidad de comunidades generadas a partir de un grafo. Estas comunidades se las ha obtenido usando un valor de 1 en la resolución. El valor de modularidad adquirido para este caso es de 0.503.	23
2.17. Grafo generado para representar el desprendimiento de nodos de forma aleatoria. En este caso se puede observar que el resultado final ha sido un nodo aislado de la red.	24
2.18. Grafo generado para representar el desprendimiento de nodos de forma aleatoria. En este caso se puede observar que el resultado final tiene dos fragmentos de red.	25
2.19. Grafo generado para representar el desprendimiento de nodos. En este caso se ha usado la métrica de centralidad de grado para el desprendimiento de nodos. El resultado final de este caso, presenta un impacto más crítico que el observado en los desprendimientos aleatorios (Figuras 2.17 y 2.18).	26
4.1. Extracto de mapa de la ciudad de Cuenca.	34
4.2. Traza modelo de movilidad Área de Desastre.	35



4.3. Traza de movilidad creada a partir del modelo de movilidad SWIM, usando NetAnim para visualizar el movimiento de los nodos.	36
4.4. Escenario de simulación de movimiento transcurridos 5 segundos desde su inicio. El escenario contiene 100 nodos distribuidos en toda su área.	37
4.5. Escenario de simulación de movimiento transcurridos 105 segundos desde su inicio. Se observan los mismos 100 nodos de la Figura 4.4, pero distribuidos de diferente manera.	38
4.6. Red de ejemplo obtenida desde Gephi. Para simular esta red, se utilizó el modelo de movilidad SWIM. La métrica analizada corresponde a la centralidad de grado. El tamaño de los nodos indica el valor de centralidad que tiene cada nodo, el tamaño del nodo es proporcional al valor de centralidad de grado. De la misma manera, la variación de colores indica el valor de centralidad de grado. Colores más saturados reflejan mayor valor de centralidad de grado en un nodo. . . .	40
5.1. Resultados promedio de cada modelo de movilidad obtenidos mediante la métrica de grado. Estos resultados se obtuvieron de simulaciones con 50, 100 y 150 nodos. La escala de valores incluidos en el eje de las ordenadas indican el valor de métrica de grado, el cual se ha descrito en la Sección 2.3.1.	47
5.2. Métrica de centralidad de grado en el modelo de movilidad SWIM con a) 50, b) 100 y c) 150 nodos.	48
5.3. Funciones de Distribución de Probabilidad de la métrica de Grado con: A) 50, B) 100 y C) 150 Nodos.	49
5.4. Resultados de los distintos modelos de movilidad, comparados mediante la métrica de intermediación. Para esta comparación se simularon 50 nodos dentro del área de simulación.	52
5.5. Resultados de los distintos modelos de movilidad, comparados mediante la métrica de intermediación. Para esta comparación se estableció 100 nodos dentro del área de simulación.	53
5.6. Resultados de los distintos modelos de movilidad, comparados mediante la métrica de intermediación. Para esta comparación se estableció 150 nodos dentro del área de simulación.	54
5.7. Resultados promedio de cada modelo de movilidad obtenidos mediante la métrica de intermediación. Estos resultados se obtuvieron de simulaciones con 50, 100 y 150 nodos. Los valores expuestos en el eje de las ordenadas corresponden a valores descritos por el algoritmo [147].	57
5.8. Gráficas de distribución del coeficiente de agrupamiento. Estas gráficas se obtuvieron de simulaciones con 50, 100 y 150 nodos sobre los modelos de movilidad: a) SMOOTH, b) SWIM, c) SLAW, d) restricciones geográficas, e) Random WayPoint (RWP) y f) área de desastre.	59
5.9. Valores promedio basados en el coeficiente de agrupamiento. Estos valores fueron obtenidos para los 6 modelos de movilidad, partiendo de simulaciones con 50, 100 hasta 150 nodos. Los valores expuestos en el eje de las ordenadas se basan en el algoritmo [149].	61
5.10. Resultados promedio de la métrica de centralidad de cercanía en los diferentes modelos de movilidad con 50, 100 y 150 nodos. Los valores expuestos en el eje de las ordenadas están descritos por el algoritmo [147].	62
5.11. Resultados promedio de la métrica de vector propio en los diferentes modelos de movilidad con 50, 100 y 150 nodos. Los valores expuestos en el eje de las ordenadas se describen a lo expuesto en la sección 2.3.4.	65
5.12. Resultados promedio de la métrica de excentricidad en los diferentes modelos de movilidad con 50, 100 y 150 nodos. Los valores expuestos en el eje de las ordenadas se describen acorde a lo presentado en la Sección 2.3.6.	68



5.13. Resultados promedio del número de comunidades generadas con 50, 100 y 150 nodos. Los valores descritos en el eje de las ordenadas están basados en el algoritmo [82].	72
5.14. Resultados de las funciones de distribución de probabilidad de comunidades en los diferentes modelos de movilidad generadas con 50, 100 y 150 nodos.	74
5.15. Gráfico de resumen donde se muestran los resultados de los modelos de movilidad, comparados usando las distintas métricas de teoría de grafos establecidas. Este gráfico se obtuvo de las simulaciones donde participaron 100 nodos en la red.	77
5.16. Resultados de PDR (%) en relación con el número de nodos en la red. Las distribuciones de PDR corresponden a los modelos SLAW y SWIM, tomando la métrica de grado para el análisis.	79
5.17. Resultados de PDR en relación con el número de nodos en la red. Las distribuciones de PDR corresponden a los modelos SWIM y restricciones geográficas, tomando la métrica de centralidad de intermediación para el análisis.	80
5.18. Resultados de PDR en relación con el número de nodos en la red. Las distribuciones de PDR corresponden a los modelos restricciones geográficas y SWIM, tomando la métrica de cercanía para el análisis.	82
5.19. Resultados promedio de retardo en los modelos de movilidad restricciones geográficas y SWIM, bajo las pruebas de servidores proxy para el caso específico de la métrica de Excentricidad.	83
5.20. Resultados promedio de retardo en los modelos de movilidad SLAW y restricciones geográficas, bajo las pruebas de servidores proxy para el caso específico de la métrica de vector propio.	84
5.21. Resultados de PDR (%) en los modelos de movilidad SLAW y SMOOTH bajo las pruebas de servidores proxy, usando la métrica de Coeficiente de Agrupamiento como punto de análisis.	85
A.1. Gráfico de resumen donde se muestran los resultados de los modelos de movilidad, comparados usando las distintas métricas de teoría de grafos establecidas. Este gráfico se obtuvo de las simulaciones donde participaron 50 nodos.	91
A.2. Gráfico de resumen donde se muestran los resultados de los modelos de movilidad, comparados usando las distintas métricas de teoría de grafos establecidas. Este gráfico se obtuvo de las simulaciones donde participaron 150 nodos.	92
A.3. Resultados de Packet Delivery Ratio (%) vs Número de nodos en las pruebas de robustez para la métrica de Eigen-Centralidad.	92
A.4. Resultados de Packet Delivery Ratio (%) vs Número de nodos en las pruebas de robustez para la métrica de Excentricidad.	93
A.5. Resultados de Packet Delivery Ratio (%) vs Número de nodos en las pruebas de robustez para la métrica de Coeficiente de Clustering.	93



Índice de tablas

2.1. Matriz de adyacencia tomada como ejemplo para el grafo de la Figura 2.3.	14
4.1. Parámetros de entrada generales para los modelos de movilidad.	32
4.2. Valores de entrada para el modelo SWIM.	32
4.3. Valores de entrada para el modelo SMOOTH.	33
4.4. Valores de entrada para el modelo SLAW.	33
4.5. Valores de entrada para el modelo Restricciones Geográficas [2].	33
4.6. Valores de entrada para el modelo RWP.	34
4.7. Valores para la distribución de cada punto de referencia.	35
4.8. Valores de entrada para el modelo RWP.	36
5.1. Distribución de métrica de intermediación con 50 nodos en la red	54
5.2. Distribución de métrica de intermediación con 100 nodos en la red	55
5.3. Distribución de métrica de intermediación con 150 nodos en la red	56
5.4. Datos estadísticos extraídos sobre cada modelo de movilidad, empleando la métrica de coeficiente de agrupamiento. Los datos contenidos en esta tabla están basados en lo descrito por la Figura 5.8. Se puede observar que ningún modelo de movilidad presenta un grado mínimo menor a dos, lo cual indica que para obtener resultados en el coeficiente de agrupamiento, debe existir mínimo un enlace en cada nodo. Los nodos aislados no se tomaron en consideración para este análisis. La varianza de cada modelo se lo obtuvo entre los valores de grado mínimo y grado máximo.	59
5.5. Porcentaje de cambio del coeficiente de agrupamiento acumulado.	60
5.6. Diferencia porcentual del valor promedio de la métrica de centralidad de cercanía, tomando como referencia el modelo restricciones geográficas. Esta diferencia se estableció para simulaciones con 50 nodos.	63
5.7. Diferencia porcentual del valor promedio de la métrica de centralidad de cercanía, tomando como referencia el modelo restricciones geográficas. Esta diferencia se estableció para simulaciones con 100 nodos.	64
5.8. Diferencia porcentual del valor promedio en la métrica de centralidad de cercanía, tomando como referencia el modelo SMOOTH. Esta diferencia se estableció para simulaciones con 150 nodos.	64
5.9. Porcentaje de cambio en la métrica de centralidad de cercanía promedio.	65
5.10. Diferencia porcentual del valor promedio en la métrica de centralidad de vector propio, tomando como referencia el modelo SLAW. Esta diferencia se estableció para simulaciones con 50 nodos.	66



5.11. Diferencia porcentual del valor promedio en la métrica de centralidad de vector propio, tomando como referencia el modelo SLAW . Esta diferencia se estableció para simulaciones con 100 nodos.	66
5.12. Diferencia porcentual del valor promedio en la métrica de centralidad de vector propio, tomando como referencia el modelo SLAW . Esta diferencia se estableció para simulaciones con 150 nodos.	67
5.13. Porcentaje de cambio en la métrica de centralidad de vector propio promedio.	67
5.14. Diferencia porcentual del valor promedio en la métrica de excentricidad, tomando como referencia el modelo RWP , cuyo valor promedio de excentricidad es el más alto de todos los modelos de movilidad. Esta diferencia se estableció para simulaciones con 50 nodos.	69
5.15. Diferencia porcentual del valor promedio en la métrica de excentricidad, tomando como referencia el modelo SWIM , cuyo valor promedio de excentricidad es el más alto de todos los modelos de movilidad. Esta diferencia se estableció para simulaciones con 100 nodos.	70
5.16. Diferencia porcentual del valor promedio en la métrica de excentricidad, tomando como referencia el modelo SWIM , cuyo valor promedio de excentricidad es el más alto de todos los modelos de movilidad. Esta diferencia se estableció para simulaciones con 150 nodos.	71
5.17. Porcentaje de cambio en la métrica de excentricidad promedio.	71
5.18. Diferencia porcentual del valor promedio en la métrica de modularidad, tomando como referencia el modelo restricciones geográficas. Esta diferencia se estableció para simulaciones con 50 nodos.	75
5.19. Diferencia porcentual del valor promedio en la métrica de modularidad, tomando como referencia el modelo restricciones geográficas. Esta diferencia se estableció para simulaciones con 100 nodos.	75
5.20. Diferencia porcentual del valor promedio en la métrica de modularidad, tomando como referencia el modelo restricciones geográficas. Esta diferencia se estableció para simulaciones con 150 nodos.	75
5.21. Tabla de resumen métricas correspondiente a cada modelo de movilidad simulado con 50, 100 y 150 nodos	76
5.22. Valores promedio y varianza obtenidos a partir de las distribuciones de PDR , descritas en la Figura 5.16.	79
5.23. Valores promedio y varianza obtenidos a partir de las distribuciones de PDR , descritas en la Figura 5.17.	81
5.24. Valores promedio y varianza obtenidos a partir de las distribuciones de PDR , descritas en la Figura 5.17.	82
5.25. Valores promedio de los retardos obtenidos para los modelos restricciones geográficas y SWIM . En ambos casos se estableció un porcentaje de disminución de retardo.	84
5.26. Valores promedio de los retardos obtenidos para los modelos glsSLAW y restricciones geográficas. En ambos casos se estableció un porcentaje de disminución de retardo.	85
5.27. Valores de PDR obtenidos para los modelos SLAW y SMOOTH . En ambos casos se estableció un porcentaje de aumento en el PDR	86



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Pablo Felipe Avilés Parra, autor de la tesis "Estudio de modelos de movilidad realistas usando métricas de teoría de grafos y su impacto en redes inalámbricas de malla", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 1 de abril del 2021

Pablo Felipe Avilés Parra

010532353-9



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Josue David Pinto Nieto, autor de la tesis "Estudio de modelos de movilidad realistas usando métricas de teoría de grafos y su impacto en redes inalámbricas de malla", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 1 de abril del 2021

Josue David Pinto Nieto

030229508-4



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Pablo Felipe Avilés Parra en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Estudio de modelos de movilidad realistas usando métricas de teoría de grafos y su impacto en redes inalámbricas de malla", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 1 de abril del 2021

Pablo Felipe Avilés Parra

010532353-9



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Josue David Pinto Nieto en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Estudio de modelos de movilidad realistas usando métricas de teoría de grafos y su impacto en redes inalámbricas de malla”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 1 de abril del 2021

Josue David Pinto Nieto

030229508-4



Certifico

Que el presente proyecto de tesis: Estudio de modelos de movilidad realistas usando métricas de teoría de grafos y su impacto en redes inalámbricas de malla, fue dirigido y revisado por mi persona.

Ing. Andrés Marcelo Vázquez Rodas, PhD
Director



Certifico

Que el presente proyecto de tesis: Estudio de modelos de movilidad realistas usando métricas de teoría de grafos y su impacto en redes inalámbricas de malla, fue dirigido y revisado por mi persona.

Ing. Darwin Fabián Astudillo Salinas, PhD
Co-director



Dedicatoria

A mis padres

por ser parte fundamental de mi vida, quienes estuvieron conmigo en las buenas y en las malas. Les dedico esta tesis en agradecimiento por todo lo que me han ofrecido en la vida.

A mi hermana

por estar conmigo en situaciones complicadas de mi vida. Te dedico esta tesis por todos esos momentos que supiste como hacerme sentir bien.

A mis amigos

por considerarles como parte de mi familia. Les dedico esta tesis en agradecimiento a todo el apoyo incondicional que me han sabido ofrecer.

A mis maestros

por esas largas horas de jornadas educativas. Para quienes me tuvieron paciencia en enseñarme todo lo que he logrado aprender. Les dedico esta tesis en honor a todo el tiempo invertido en mi.

Pablo Felipe Avilés Parra



Dedicatoria

A mi familia

quienes con su amor, paciencia, esfuerzo y apoyo incondicional me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mi el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades.

Les dedico esta tesis a mi familia como agradecimiento por estar conmigo en todo momento.

Josué David Pinto Nieto



Agradecimientos

A nuestro director Andrés Vázquez,

por su apoyo incondicional y sus amplios conocimientos en telecomunicaciones, que fueron parte fundamental para desarrollar de manera exitosa este trabajo. Muchas gracias por su tutoría, consejos, motivación, paciencia, amistad y confianza que nos brindó.

A nuestro co-director Fabián Astudillo

por su tiempo, experiencia y conocimientos compartidos que nos fueron de mucha ayuda en el desarrollo de este trabajo. Su ayuda fue imprescindible para optimizar muchos procesos y mejorar el presente trabajo de titulación.

A la Universidad de Cuenca

por ofrecernos los conocimientos necesarios para lograr nuestro objetivo en este trabajo. Gracias por permitirnos usar herramientas de hardware necesarias para poder llevar a cabo las múltiples simulaciones imprescindibles para la realización de este trabajo.

A nuestros Padres y Abuelos

por ofrecernos ese amor incondicional que nos motivó a no rendirnos en el transcurso de la carrera.

¡Gracias a Ustedes!

LOS AUTORES



Abreviaciones y Acrónimos

APP Punto de estacionamiento de ambulancias. 34

BM BonnMotion. 3, 30, 32

CCS Estación de compensación de víctimas. 34

FSP Free Space Propagation. 37

GPS Global Positioning System. 6

HWMP Hybrid Wireless Mesh Protocol. 42

ICT Inter Contact Time. 6–9, 11

IL Ubicación del incidente. 34

LTE Long Term Evolution. 28

MBSLAW Map Based Self-Similar LEast Action Walk. 11

MC Mesh Client. 1, 4

MR Mesh Router. 1, 4

NA NetAnim. 36

NS-2 Network Simulator 2. 37

NS-3 Network Simulator 3. 3, 28, 36, 37, 42, 43

OSM Open Street Maps. 33

PDR Packet Delivery Ratio. 27, 28, 41, 43, 45, 78–82, 85–87, 89, 90

PWT Pacientes en espera del área de tratamiento. 34

RWP Random WayPoint. 2, 3, 6, 12, 29, 32, 35, 46, 50–56, 58–60, 62–65, 67–71, 77

SLAW Self-Similar Least Action Walk. 2, 6, 8, 9, 32, 46, 47, 49–56, 58–60, 64–71, 73, 77–79, 84–87, 89

SUMO Simulation Of Urban Mobility. 3, 30, 32, 33

SWIM Small World In Motion. 2, 6–9, 32, 37, 46–56, 58–60, 63, 64, 66–71, 77–84, 89

TOC Comando técnico operacional. 34

UDP User Datagram Protocol. 42

WMN Wireless Mesh Network. 1–6, 8, 11, 12, 14, 15, 23, 27–29, 31, 41–43, 46, 85, 88, 90



Introducción

1.1. Identificación del problema

Las redes inalámbricas de malla, **WMNs**, son redes multi-salto y auto-configurables capaces de interconectar dispositivos móviles, o nodos, a través del uso de conexiones automáticas *ad-hoc* [3]. Estos nodos pueden comportarse como enrutadores (**MRs**) o como clientes (**MCs**). Este comportamiento dependerá de la arquitectura que se escoja para la red. Basado en el comportamiento de los nodos, las **WMNs** presentan tres tipos de arquitecturas: **WMNs** basadas en infraestructura (los enrutadores son fijos sobre la red, mientras que los **MCs** pueden desplazarse y acceden a los servicios de red a través de un **MR**); **WMNs** sin infraestructura (los dispositivos actúan tanto como **MCs** y como **MRs** simultáneamente y pueden o no ser móviles); y finalmente las **WMNs** híbridas (como una combinación de las dos arquitecturas anteriores, es decir, existe una red de malla con nodos de infraestructura y adicionalmente los dispositivos clientes pueden formar su propia red en malla de mejor jerarquía).

En términos de movilidad y automatización de la red, la arquitectura **WMN** sin infraestructura resulta ser la más conveniente. Para prueba de ello, ha surgido una nueva aplicación del paradigma de arquitectura **WMN** sin infraestructura, el cual se ha denominado como **WMN** espontánea [4–6]. En este caso, el estudio de la movilidad de los nodos es un factor determinante dentro de la red, puesto que los dispositivos no se mueven de forma aleatoria. Esto es, los nodos son transportados por personas desde un lugar a otro y por tanto, adquieren los patrones de movilidad pedestres típicos. Dichos patrones de movilidad se han venido emulando en la literatura a través de modelos de movilidad realistas.

Con el fin de optimizar la operación y funcionamiento de redes **WMNs** espontáneas, y para mejorar la eficiencia de las mismas, en trabajos previos se ha demostrado que es conveniente seleccionar solamente un subconjunto de nodos para que realicen la función de enrutadores de la red. Para esto, se puede hacer una evaluación de la red mediante el uso de métricas de teoría de grafos [7–9]. Estas métricas son de gran utilidad, pues mediante éstas se pueden establecer diferencias topológicas entre distintas redes **WMNs** [7].

Muchos estudios han demostrado la utilidad y aplicabilidad de algunas métricas de teoría de grafos sobre las redes complejas en general, por ejemplo [10–12]. Estos estudios se han basado en el concepto de robustez de red [13], y en ellos se han utilizado principalmente tres métricas de teoría de grafos.

En este contexto, en este trabajo se ha identificado que, dichos conceptos de robustez de red junto con modelos de movilidad realistas no han sido aplicados ni evaluados sobre redes inalámbricas de malla espontáneas. Tampoco se han evaluado y establecido diferencias topológicas entre modelos de movilidad realistas disponibles en la literatura. Al no establecer diferencias topológicas entre estos modelos, no se sabe con exactitud si los mismos difieren al aplicar el concepto de robustez de red. Entonces, los modelos de movilidad realistas, podrían presentar, o no, características similares al evaluarlos con distintas métricas de teoría de grafos. Las respuestas a estas interrogantes, constituyen por tanto las principales contribuciones del presente trabajo.

1.2. Justificación

La evaluación de las WMNs espontáneas ha dejado de considerar modelos de movilidad aleatorios, puesto que los resultados obtenidos se acercaban más a entornos ideales que realistas [14–18]. El movimiento de los nodos es completamente dependiente del patrón de movilidad humana ya que los dispositivos móviles son transportados por personas [1, 2]. Por esta razón, las trazas de movilidad no pueden ser consideradas aleatorias. Tal como se mencionó con anterioridad, las WMNs espontáneas son redes que se forman por la interconexión de dispositivos portátiles (principalmente teléfonos móviles). Cuando estos dispositivos son asociados con personas, quienes se mueven de un lugar a otro, los nodos adquieren el mismo patrón de movilidad. Para entender el movimiento de un ser humano, se necesitan tres propiedades importantes que deben ser tomadas en consideración: propiedades espaciales, temporales y sociales [19]. Las propiedades espaciales están relacionadas con las distancias que cubren las personas cuando se movilizan de un punto a otro. Las propiedades temporales consideran la frecuencia con la que se visitan lugares comunes, el tiempo que un usuario se queda inmóvil en una localización específica, y la probabilidad de regresar a lugares visitados frecuentemente. El comportamiento social es la propiedad más relevante de las tres, puesto que define las características de conectividad entre diferentes usuarios. Esta propiedad está caracterizada por tiempos de inter-contacto (frecuencia) y por tiempos de contacto (duración).

En base a estudios de modelos de movilidad realistas, en la literatura se han propuesto modelos como: SWIM [20], SMOOTH [21], SLAW [22], Restricciones Geográficas [23], Área de Desastre [24], y RWP como modelo de referencia. Todos los modelos de movilidad previamente descritos toman como base dos parámetros fundamentales (propiedades espaciales y temporales). Estos dos parámetros no son suficientes para un modelado realista, por lo que la inclusión de un parámetro adicional, denominado anteriormente como comportamiento social, resulta necesario. Este último parámetro difiere dependiendo del modelo de movilidad, pues da características específicas que distinguen a cada uno.

Cuando los modelos de movilidad antes descritos, se aplican a las WMNs espontáneas se pueden establecer diferencias topológicas sobre las topologías de redes resultantes. Estas diferencias se pueden describir mediante el uso de las métricas de teoría de grafos. Las métricas más relevantes evalúan, por ejemplo, la información de cuántos enlaces tiene un nodo (centralidad de grado) [11], la medida de la frecuencia con la que aparece un nodo en las rutas más cortas (centralidad de intermediación) [25], la tendencia que tienen los nodos a agruparse formando triángulos en su vecindario (coeficiente de agrupamiento) [26], el número de veces que se parte un grafo para establecer comunidades (modularidad) [27], la distancia promedio desde el nodo de interés hacia todos los demás nodos que se encuentren en la red (centralidad de cercanía) [28], la distancia desde el nodo de interés hacia el nodo más lejano en la red (excentricidad) [29] y la influencia de cada nodo dentro de la red (centralidad de vector propio) [30, 31]. Todas las métricas previamente mencionadas son las más representativas en teoría de grafos [32, 33] y con ellas es suficiente para poder establecer una comparación entre los modelos

de movilidad. Finalmente, con esta información se evaluaría el impacto que tendrían las diferentes topologías resultantes de estos modelos de movilidad en el comportamiento de las WMNs espontáneas.

Estudios realizados en [10–12] han considerado solo tres métricas, correspondientes a centralidad de grado, centralidad de intermediación y centralidad de cercanía. Lo que se pretende en este trabajo es ampliar ese número de métricas analizadas, tomando en consideración todos los seis modelos de movilidad realistas previamente descritos y con un enfoque centrado en las redes inalámbricas de malla sin infraestructura.

1.3. Alcance

Se evaluarán seis modelos de movilidad realistas disponibles en la literatura y que han sido descritos anteriormente. Estos modelos de movilidad se evaluarán a través de seis métricas de teoría de grafos. Estas métricas corresponden a la centralidad de grado, centralidad de intermediación, centralidad de cercanía, centralidad de vector propio, excentricidad y coeficiente de agrupamiento. Cada modelo de movilidad será evaluado bajo cada una de las métricas propuestas. Al final se obtendrán resultados que permitirán distinguir el grado de relevancia de un modelo u otro respecto a una métrica específica.

Una vez establecidos los análisis sobre cada modelo de movilidad, se tomarán los resultados de los modelos más relevantes en cada métrica. Estos resultados se compararán con los obtenidos sobre las distintas métricas bajo el concepto de robustez de red. En este punto se pretende analizar qué métrica de teoría de grafos resulta más relevante en términos de robustez de red.

Por último, basado en las propuestas anteriores, se establecerán conclusiones sobre que modelos de movilidad son los más relevantes; así como la métrica que resulta más relevante en términos de robustez de red.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Establecer un análisis comparativo de los modelos de movilidad disponibles para WMNs, con el fin de verificar la existencia de diferencias topológicas relevantes, y analizar su impacto en el desempeño de las redes resultantes.

1.4.2. Objetivos específicos

El presente trabajo tiene los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar los modelos de movilidad pedestres realistas más relevantes para WMNs entre los que se incluya el modelo RWP como modelo de referencia.
- Identificar las métricas de teoría de grafos que permitan comparar los modelos de movilidad.
- Comparar los modelos de movilidad a través de las distintas métricas de teoría de grafos utilizando herramientas de software libre como BM y SUMO para la generación de trazas, NS-3 para la simulación de tráfico de información sobre una red y Gephi para el análisis de los resultados.
- Evaluar el impacto de las topologías resultantes con los distintos modelos de movilidad en el rendimiento de redes inalámbricas de malla, mediante conceptos de robustez de red.



Marco teórico

El presente capítulo está dividido en cuatro secciones. La Sección 2.1 presenta una visión general de las redes inalámbricas de malla, define las distintas arquitecturas de red, así como el comportamiento de los nodos dentro de la misma. El comportamiento de los nodos dependerá en parte de las trazas generadas por modelos de movilidad. Existen varios modelos de movilidad, en la Sección 2.2 se revisan los modelos de movilidad más relevantes y que se usarán en este trabajo. Para comparar el comportamiento de las redes WMNs operando con los diferentes modelos de movilidad son necesarias métricas; se usarán métricas de la teoría de grafos, éstas están descritas en la Sección 2.3. Las métricas de la teoría de grafos ofrecen información útil sobre las topologías generadas por las WMNs. Esta información ayuda a ver cómo evolucionan las redes a lo largo del tiempo. Durante la operación de las WMNs, pueden surgir ciertos problemas de funcionamiento. Uno de los principales problemas dentro de la operación de las WMNs es el fraccionamiento de la red y la desconexión de ciertos de nodos. Este tema, junto con el concepto de robustez de red es abordado en la Sección 2.5.

2.1. Redes Inalámbricas de Malla

Una red inalámbrica de malla WMN es un tipo de red multi-salto y auto-configurable. Este tipo de red permite la interconexión entre dispositivos móviles, a los cuales se los referirá como nodos. Las WMNs están compuestas por dos tipos de dispositivos: los nodos cliente o clientes de malla (MC) y los enrutadores de malla (MR). Evidentemente, la diferencia entre los MC y los MR, es que los últimos tienen la función principal de enrutar el tráfico generado por los nodos cliente.

Las WMNs presentan tres tipos de arquitecturas: con infraestructura, sin infraestructura e híbridas. Las WMNs con infraestructura cuentan con MRs fijos y con MCs con libre movilidad. Los MCs pueden cambiar de MR a medida que se desplazan dentro de la red. Por su parte, las WMNs sin infraestructura no restringen la movilidad a los miembros de la red. En esta arquitectura los mismos MCs actúan simultáneamente como MRs generando el tráfico de usuario, estableciendo enlaces entre sí, mediante el uso de conexiones *ad hoc* y controlando el enrutamiento de sus pares. Por último, las WMNs híbridas son una combinación entre las dos arquitecturas anteriores.

De acuerdo a trabajos recientes [4–6, 34, 35], existe mucho interés en una nueva aplicación de la arquitectura de red inalámbrica de malla sin infraestructura denominada WMN Espontánea. En este tipo de red, los nodos

operan con conexiones *ad hoc* y actúan tanto como dispositivos de usuario final y como enrutadores del tráfico. En trabajos previos se ha evidenciado que, con el fin de optimizar el funcionamiento y operación de este tipo de redes, se puede seleccionar solamente un subconjunto de nodos para que realicen las funciones de enrutamiento. Para esto, una posible opción es la de hacer una evaluación de red mediante el uso de métricas de centralidad la de teoría de grafos [36].

Por otra parte, tradicionalmente, los primeros modelos de movilidad considerados para la evaluación de las WMN fueron aleatorios; sin embargo, estos son cada vez menos usados puesto que los resultados no son realistas [37–42]. Sobre todo en las redes espontáneas bajo estudio, los nodos son transportados por personas, por lo tanto, el movimiento de estos depende del patrón de movilidad humana [1].

Para entender el movimiento de un ser humano, se necesitan de tres propiedades importantes: propiedades espaciales, temporales y sociales [19]. Las propiedades espaciales están relacionadas con las distancias que cubren las personas cuando se movilizan de un punto a otro. Las propiedades temporales consideran la frecuencia con la que se visitan lugares comunes, el tiempo que un usuario se queda inmóvil en una ubicación específica, y la probabilidad de regresar a lugares visitados frecuentemente. El comportamiento social es la propiedad más relevante de las tres, pues define características de conectividad entre diferentes nodos. Esta propiedad está caracterizada por tiempos de inter-contacto (frecuencia) y por tiempos de contacto (duración). A continuación se describen los modelos de movilidad realistas disponibles en la literatura y que se utilizarán en el este trabajo.

2.2. Modelos de Movilidad

Varios experimentos han sido realizados en torno a la movilidad dentro de las WMNs [20–22, 38]. Estos experimentos han demostrado que la movilidad de los nodos no es aleatoria. Existen dos tipos principales de modelos de movilidad: modelos basados en trazas [43–46] y modelos sintéticos [47–49]. Los modelos de movilidad basados en trazas parten del uso de patrones de movilidad reales, tomados de nodos que se mueven bajo distintos escenarios; por ejemplo: campus universitarios, centros comerciales y aeropuertos [21]. Por otra parte, los modelos sintéticos son generados a partir de distribuciones de probabilidad y formulaciones matemáticas [50]. Estos modelos pueden generar trazas aleatorias o generar trazas cercanas al movimiento real de los nodos. El grado de realismo que presentan se mide al comparar con modelos basados en trazas [51–55].

Para generar modelos sintéticos realistas, se deben usar un gran número de parámetros de entrada. Munjal et. al. [21] indican que un modelo de movilidad sintético debe ser lo suficientemente sencillo de implementar, y que además, tenga la capacidad de generar trazas lo suficientemente realistas. Entonces, es importante establecer un balance entre la cantidad de parámetros de entrada y el grado de realismo deseado.

Los modelos de movilidad sintéticos, a los cuales se los referirá solo como modelos de movilidad, se parametrizan usando [56]: localización inicial de los nodos, dirección en la que se mueven los nodos, rango de velocidad con el que se mueven los nodos y los cambios de velocidad de los nodos a lo largo del tiempo [57]. Los parámetros listados se basan en dos propiedades: espaciales y temporales [1]. Adicionalmente, se agrega una tercera propiedad denominada **comportamiento social**. Esta última propiedad es una característica de modelos realistas basados en el comportamiento humano. Esta propiedad indica las distribuciones de probabilidad que usarán los modelos de movilidad. Las tres distribuciones de probabilidad más utilizadas son cola pesada [58], ley de potencias [59] y exponencial decadente [60]. Adicional a estas distribuciones, cada modelo de movilidad maneja funciones matemáticas específicas. Estas funciones matemáticas relacionan los parámetros de entrada de cada modelo de movilidad. Esta relación sirve para validar la generación de trazas [22].

Dentro de la literatura, existe una gran variedad de modelos de movilidad. Para este estudio se han conside-

rado seis modelos de movilidad específicos: [SWIM](#) [20], [SMOOTH](#) [21], [SLAW](#) [22], área de desastre [61], restricciones geográficas [62] y [RWP](#) [14]. Adicional a estos seis modelos, se ha descrito el modelo caminata de Levy en la Subsección 2.2.1. Este modelo sirve como punto de partida para la generación de modelos realistas. También, el modelo caminata de Levy indica las distribuciones de probabilidad que se usaron para generar las primeras trazas realistas.

2.2.1. Caminata de Levy

El patrón de movilidad basado en la caminata de Levy [63] nació como un modelo para generar trazas aleatorias. Este modelo hace uso de las distribuciones de Weibull, lognormal, Pareto y Pareto truncado (las mismas que se basan en distribuciones de cola pesada y ley de potencia) para los vuelos y tiempos de espera para los vuelos de los nodos. Un vuelo se define como el viaje en línea recta que produce un nodo desde un lugar a otro, sin cambio de dirección o pausas intermedias [58]. El desplazamiento de los nodos, que no es similar en concepto al vuelo, tiene características no lineales respecto al tiempo. Esto se debe a la difusión anómala [64].

Tomando en consideración los aspectos antes mencionados, se realizaron pruebas sobre [WMNs](#) usando la caminata de Levy como modelo de movilidad. Estas pruebas se compararon tomando trazas del sistema de posicionamiento global, [Global Positioning System \(GPS\)](#), como puntos de referencia [65]. Las pruebas efectuadas generaron resultados similares entre la caminata de Levy y las trazas de [GPSs](#). De esta forma se pudo concluir que la movilidad humana puede ser modelada mediante distribuciones de cola pesada y ley de potencia [20] [40] [22]. Posterior al estudio realizado sobre la caminata de Levy, se empezó a desarrollar nuevos modelos de movilidad. Estos toman como base las distribuciones de cola pesada y ley de potencia. Dichos modelos de movilidad corresponden a [SWIM](#), [SMOOTH](#) y [SLAW](#) y se describen a continuación.

2.2.2. Modelo de movilidad [SWIM](#)

El modelo de movilidad [SWIM](#) [20] es un modelo basado en la implementación de pequeñas comunidades. La información obtenida en cada comunidad es más sencilla de analizar que el grafo en conjunto. Los análisis independientes de las comunidades permiten generalizar el comportamiento global de la red [66].

Es un modelo que se deriva de la caminata de Levy y por lo tanto adquiere características de movilidad basadas en distribuciones de ley de potencias [67] y exponencial decadente [60]. Estas distribuciones son aplicadas a distribuciones de tiempo denominadas tiempo inter-contacto, [Inter Contact Time \(ICT\)](#). Estas [ICTs](#) definen el tiempo que un nodo permanece estático dentro de la red. Este tiempo beneficia las oportunidades para establecer comunicación entre dispositivos, ampliando su uso en redes móviles ad-hoc. Durante los primeros intervalos de tiempo los [ICTs](#) siguen un comportamiento basado en la ley de potencias. Luego del primer intervalo, los [ICTs](#) son truncados mediante el uso de la exponencial decadente.

Los parámetros de entrada definidos por el modelo de movilidad [SWIM](#) son:

- **Rango de transmisión del nodo:** indica la máxima distancia a la que dos nodos establecen un enlace.
- **Peso de distancia de la celda:** permite decidir el próximo destino de los nodos.
- **Multiplicador de velocidad del nodo:** define una velocidad constante para todos los nodos.
- **Límite superior de tiempo de espera:** establece el tiempo máximo de espera de un nodo.

A continuación se define el procedimiento usando por [SWIM](#) para generar las trazas. Para comenzar, se define un área de simulación; esta área está dividida en celdas rectangulares de tamaño igual al radio de transmisión de los nodos; mientras más nodos se agrupen en una celda, mayor peso tendrá la misma. Los nodos se mueven

desde una posición inicial, ésta es asignada de forma aleatoria dentro de la red. Cada nodo puede desplazarse de un lugar a otro dentro del área de simulación. Los nodos se desplazan sobre la red a velocidad constante, simulando la caminata humana. Para decidir el siguiente destino que tomarán los nodos, se utiliza un parámetro de cercanía denominado α . Este parámetro toma valores entre 0 y 1. Mientras α tienda a 1, los nodos dentro de la red visitarán lugares cercanos a su posición de origen (Figura 2.1a). En cambio, si α tiende a 0, los nodos visitarán las celdas con mayor peso (Figura 2.1b).

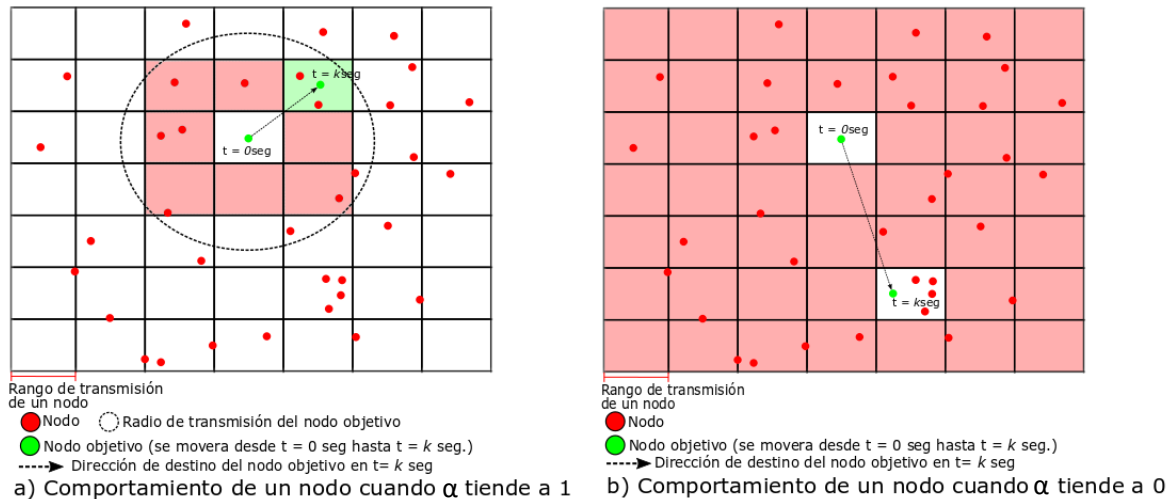


Figura 2.1: Figura tomada como ejemplo de [2]. Esta figura especifica el comportamiento del parámetro α cuando se acerca a 1 (a) y cuando se acerca a 0 (b).

2.2.3. Modelo de movilidad SMOOTH

SMOOTH [21] es un modelo de movilidad basado en el funcionamiento de la caminata de Levy. Al igual que SWIM, SMOOTH cuenta con ICTs, cuyo funcionamiento parte de distribuciones de ley de potencias y exponencial decadente. Este modelo también forma pequeñas comunidades y permite definir el número de comunidades dentro del área de simulación.

SMOOTH genera patrones de movilidad realistas. Estos patrones han sido verificados al compararlos con modelos basados en trazas [21]. Los parámetros que se han tomado en consideración para validar el modelo SMOOTH son:

- **Vuelos:** distancia cubierta por dos localizaciones consecutivas.
- **ICTs:** tiempo de contacto entre dos nodos para establecer un enlace.
- **Tiempos de pausa:** tiempo que un nodo permanece estático dentro de la red.
- **Distribución:** indica el comportamiento de los nodos dentro de la red. Toma en consideración el área de trabajo para distribuir los nodos de forma aleatoria.
- **Comportamiento:** indica si los nodos se mueven de forma aleatoria o generan algún patrón de movilidad al desplazarse.
- **Probabilidad de locación:** probabilidad de que un nodo visite una nueva localización sin que ésta haya sido visitada previamente.
- **Probabilidad de locación previa:** probabilidad que tiene un nodo de transitar por una localización previa.

Estos criterios de evaluación han sido obtenidos mediante estudios realizados en [68]. Estos criterios establecen parámetros de entrada específicos para el modelo SMOOTH. Los parámetros de entrada son:

- **Rango de transmisión del nodo:** indica la máxima distancia a la que dos nodos establecen un enlace. Estos enlaces se producen mediante conexiones ad-hoc.
- **Número de grupos:** propone el número de comunidades que se generarán dentro del área de simulación.
- **Distribución de viajes:** un nodo puede elegir su destino dentro de los grupos establecidos en el entorno de simulación. Una vez que el nodo escoge su destino, el modelo calcula la velocidad del viaje y la velocidad de desplazamiento. Este cálculo se realiza mediante parámetros que describen el comportamiento asintótico de la distribución de viajes [65].
- **Distribución de tiempos de detención:** una vez que el nodo ha llegado a su destino, permanece en éste por un cierto período de tiempo. Este período de tiempo se obtiene utilizando parámetros que describen el comportamiento asintótico de la distribución de tiempos de detención [59].

Dentro de una WMN, los nodos que obedecen el comportamiento del modelo de movilidad SMOOTH forman agrupaciones de diferente tamaño. Estas agrupaciones son distribuidas de forma aleatoria y uniforme sobre toda el área de simulación. A cada agrupación se le asigna un valor denominado **popularidad**. Este valor indicará la frecuencia con la que un nodo visita cada agrupación. Entonces, una agrupación con un valor de popularidad alto es más propenso a ser elegido como zona de destino.

Debido al comportamiento social de los nodos [40][69], los mismos tienden a agruparse en comunidades. Estas comunidades se forman, generalmente, en sitios de alta concurrencia, obedeciendo a los patrones del comportamiento humano. Por ejemplo, dentro de un edificio hay oficinas que son más visitadas que otras. Estas oficinas podrían ser: salas de videoconferencia, salas de estar, entre otras.

2.2.4. Modelo de movilidad SLAW

SLAW [22] es un modelo de movilidad que también comparte características similares a SWIM y SMOOTH. Estas características se basan en la implementación de ICTs. A pesar de poseer distribuciones de tiempo similares, SLAW se presenta como un modelo complejo de implementar frente a SWIM y SMOOTH. Su complejidad se debe a la forma de comportamiento de los nodos, así como a la cantidad de parámetros de entrada necesarios.

Las trazas de movilidad generadas por SLAW presentan una cierta particularidad. En SWIM y SMOOTH, cada agrupación de nodos posee características distintas respecto a toda la red. En cambio, el modelo SLAW proporciona características de auto-similitud entre las agrupaciones de nodos y la red conjunta. Esto se debe a que SLAW genera trazas de movilidad basadas en puntos de referencia como fractales [70] [71].

Los nodos trazan rutas que indican cierta afinidad a lugares comunes. Estos nodos rara vez se desvían de sus rutas definidas. Por ejemplo, nodos representados por estudiantes trazan patrones de movilidad indicando trayectorias a centros educativos. Basado en esta premisa, la generación de movilidad SLAW toma en consideración las siguientes características [22]:

- **Vuelos con distribución de cola pesada:** Las trazas generadas por los nodos usan la distribución de cola pesada [22] [72] [73].
- **Tiempos de espera:** indican el tiempo que los nodos permanecen estáticos dentro de la red.
- **Área de movilidad heterogénea limitada:** indica que los nodos tienen zonas de interés a las cuales recorren con frecuencia. Los nodos limitan su movimiento dentro de estas zonas y rara vez salen de este entorno.

- **ICTs y ley de potencia truncada:** existe una variación respecto a los modelos [SWIM](#) y [SMOOTH](#). En este caso los [ICTs](#) usan una distribución de potencia truncada para la distribución de tiempos [\[72\]](#).
- **Puntos de referencia auto-similares:** indica que los nodos dentro de una red son atraídos a lugares populares. Los puntos de referencia auto-similares son una propiedad típica de los fractales [\[74\]](#).
- **Planificación de viaje de acción mínima:** establece que un nodo tiene más probabilidades de visitar lugares cercanos a su ubicación inicial. Esto sucede luego de visitar varias ubicaciones sucesivas.

[SLAW](#) toma en consideración las características antes mencionadas para desarrollar sus parámetros de entrada. Estos parámetros son:

- **Número de puntos de referencia:** este valor especifica lugares de interés. Cada punto de referencia atraerá a los nodos dependiendo del parámetro *Hurst*. A manera de ilustración, en la [Figura 2.2](#) se definen varios puntos de interés, así como la trayectoria generada por un nodo en particular.
- **Exponente de tiempo de espera basado en el proceso Levy:** indica cuánto tiempo estarán detenidos los nodos después de realizar un desplazamiento.
- **Parámetro de Hurst:** es el grado de auto-similitud que tienen los puntos de referencia. Este valor oscila entre 0 y 1. La auto-similitud se hace notable por encima del valor 0.5. Para valores menores a 0.5, el proceso se vuelve no auto-similar [\[71\]](#).
- **Peso de la distancia:** especifica el próximo destino que elegirá un nodo.
- **Rango de agrupamiento:** indica la distancia máxima a la que los nodos pueden pertenecer a un grupo específico. Esta distancia está gobernada por los puntos de referencias.
- **Radio del grupo:** es la cantidad máxima de nodos que pueden agruparse alrededor de un punto de referencia.

El peso de distancia se describe por la letra α y el exponente de Levy por la letra β . Estos dos parámetros se relacionan para crear un entorno de simulación válido [\[22\]](#). Esta relación se describe en la Ecuación [\(2.1\)](#).

$$\alpha + \beta \approx 1 \quad (2.1)$$

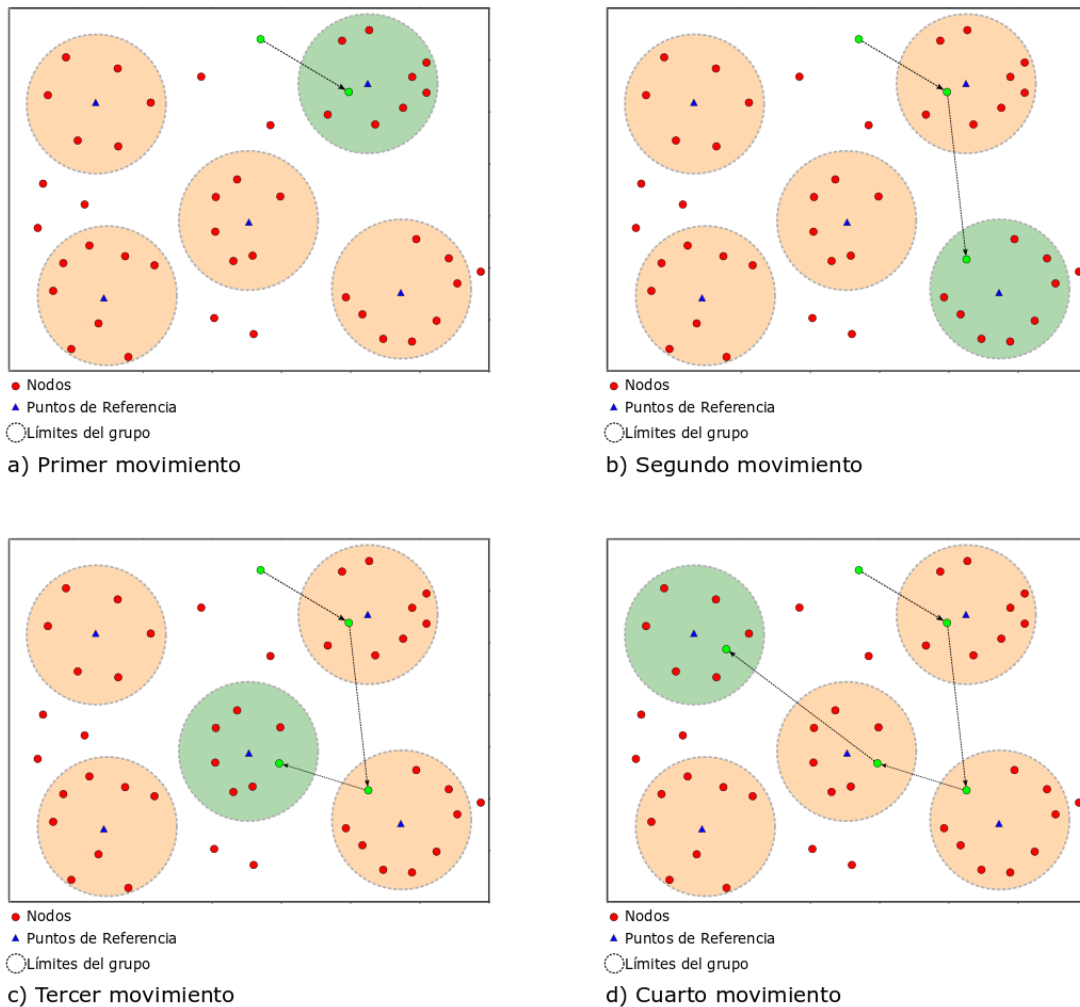


Figura 2.2: Desplazamiento de un nodo de acuerdo al modelo de movilidad SLAW. El nodo cruza a través de cuatro puntos de referencia distintos.

2.2.5. Modelo de movilidad área de desastre

Se ha descrito hasta el momento trazas de nodos con movimientos dentro de edificios, campus universitarios, centros comerciales, entre otros. Estas trazas presentan un comportamiento social común en los nodos. En situaciones de riesgo, el comportamiento de los nodos cambia de forma significativa. Este comportamiento se basa en agrupaciones de nodos distribuidos de forma específica. Estas agrupaciones definen dos clases de nodos: nodos damnificados y nodos auxiliares. Los nodos damnificados estarán representados por personas víctimas de un desastre natural. Los nodos auxiliares estarán representados por personas que acuden al rescate. Las agrupaciones de estos nodos se basa en estudios realizados en [61]. Estas agrupaciones forman cinco puntos de referencia los cuales son:

- Sitio de incidente.
- Área de tratamiento de víctimas.
- Área de compensación de víctimas.
- Zona de transporte (área de ambulancias y helicópteros).
- Zona de comando técnico operacional.

Cada agrupación de nodos cumple cierta función en el área de simulación. En el sitio del incidente se encuentran todos los nodos damnificados. El área de tratamiento de víctimas es el lugar donde se trasladan los nodos damnificados. El área de compensación de víctimas da apoyo a los damnificados (comida, refugio, etc). La zona de transporte lleva a las víctimas en estado crítico a hospitales y centros de salud especializados. Por último, la zona de comando técnico operacional se encargará de establecer y dotar de servicio técnico a los nodos auxiliares.

Bajo estas premisas, se define el modelo de movilidad **área de desastre** [61]. Este modelo se basa en una táctica de rescate llamada **separación de espacio**. Esta táctica es necesaria para distribuir lugares de atención para las víctimas de un desastre y la ubicación del personal auxiliar (bomberos, médicos, etc) [75]. Para modelar este comportamiento se usa distribuciones de cola pesada [73].

Tomando en consideración los protocolos de emergencia descritos en [75], se presentan las siguientes características:

- **Movimiento heterogéneo dependiente de las áreas:** los nodos tienen diferente comportamiento dependiendo del área en la que se encuentren.
- **Movimiento en caminos óptimos evitando obstáculos:** los nodos analizan todos los caminos posibles y seleccionan el óptimo.
- **Los nodos se unen y abandonan áreas específicas:** los damnificados y el personal auxiliar se mueven entre distintas áreas.
- **Movilidad grupal (opcional):** dependiendo de la ubicación o rol del nodo, éste tiene la opción de moverse grupalmente, en cuyo caso existe un nodo líder del grupo.

El objetivo de este modelo es el de obtener un escenario específico en el que se puedan poner a prueba sistemas de comunicación. Esto con la finalidad de verificar el funcionamiento óptimo y eficiente de una WMN en situaciones de emergencia.

2.2.6. Modelo de movilidad con restricciones geográficas

Los cuatro modelos anteriores generan nodos con trazas de movilidad libre. Esto significa que el movimiento de los nodos se produce sin restricciones en toda el área de simulación. En cambio, el modelo de movilidad conocido como **restricciones geográficas**, limita el movimiento de los nodos dentro del área de simulación. Los límites impuestos por restricciones geográficas se basan en el modelo de movilidad **Map Based Self-Similar LEast Action Walk (MBSLAW)** [23].

El modelo con restricciones geográficas limita el movimiento dependiendo de los entornos que se desean simular. Estos entornos son: calles, parques, estadios y espacios abiertos en general. Todos estos entornos contienen obstáculos que restringirán el movimiento de los nodos. Estos obstáculos son paredes, muros, cercas, vallas, edificios, etc.

Para generar trazas con restricciones geográficas, es necesario abstraer mapas de los entornos de interés. La abstracción de estos mapas se realiza con cualquier software que genere archivos de extensión **osm**. El primer paso es obtener el mapa para generar las trazas. Luego se generan los nodos dentro del mapa. Por último, se establece la velocidad y distancia máxima de recorrido de los nodos.

Este modelo genera trazas de movilidad basados en **ICT**. Esto permite que se establezcan los enlaces entre pares de nodos. Los enlaces se establecen mediante conexiones ad-hoc como el resto de modelos de movilidad antes mencionados.

2.2.7. Modelo de movilidad RWP

El modelo de movilidad **RWP** [46] no entra en el grupo de modelos realistas. Esto se debe a que la movilidad de los nodos se representa principalmente de forma aleatoria. La distribución de los nodos en la red se la hace mediante una distribución uniforme.

RWP basa su funcionamiento en dos de las tres propiedades presentadas en la Sección 2.1: temporales y espaciales. Las propiedades temporales se refieren a los tiempos de espera. Estos tiempos de espera son generados a partir de un parámetro fijo. Las propiedades espaciales se refieren a la distribución de los nodos sobre la red. Para ello se usan distribuciones de probabilidad uniformes.

Al carecer de la propiedad **comportamiento social**, **RWP** genera trazas de movilidad con distribuciones uniformes. Para ello se usa el parámetro **dimensiones**. Estas dimensiones son tres y corresponden a las coordenadas x, y, z . Una vez definidas las dimensiones, los nodos se moverán de un lugar a otro por éstas. Cada que culmina un desplazamiento, los nodos se detienen por un tiempo de espera establecido. Adicionalmente, se configura la velocidad (V_m) a la cual los nodos se desplazan. De esta manera, los nodos se mueven en función de tres parámetros (P_n, P_{n+1}, V_m). P_n especifica la posición actual del nodo, P_{n+1} indica la posición a la cual se desplazará el nodo y V_m representa la velocidad con la que se ha desplazado el nodo.

RWP no es un modelo propicio para ser usado en simulaciones de **WMNs**. Como se mencionó en la Sección 2.1, se han considerado estudios que indican resultados menos realistas al usar el modelo **RWP**. Sin embargo, este último sigue siendo objeto comparativo de base para la implementación de mejoras en el rendimiento de las **WMNs** [76–78]. Estos estudios han permitido considerar a **RWP** como un modelo de referencia frente a modelos de movilidad más realistas.

2.3. Métricas de teoría de Grafos

Dentro del estudio de **WMNs** existen nodos que resultan ser más relevantes para la red. La relevancia de cada nodo se puede describir mediante el uso de **métricas de teoría de grafos** [79]. Estas métricas ofrecen distintos parámetros de análisis. Tres parámetros serán utilizados para describir las métricas principales dentro de la teoría de grafos [7–9, 80]: la centralidad de red, las distancias entre nodos y la densidad de nodos. La centralidad de red es un atributo que se asigna a cada uno de los nodos dependiendo de su localización en la red. Las distancias entre nodos no solo consideran los valores entre nodos adyacentes, sino se incluyen las distancias relativas entre nodos de toda la red. Por último, la densidad de nodos mide la aglomeración de nodos en puntos específicos.

Dentro de las métricas propuestas en esta sección, destaca una métrica más denominada **modularidad**. Esta métrica no ofrece información relevante para la red, pero la razón por la que se la colocó se debe a que las métricas de vector propio, excentricidad y coeficiente de agrupamiento no pudieron ser evaluadas con la misma metodología que el resto de métricas de teoría de grafos propuestas. De esta manera, se utilizó la métrica de modularidad para combinarlas con cada una de las últimas métricas mencionadas y para generar una nueva metodología para el análisis de las mismas.

Basados en los parámetros descritos previamente, seis métricas de teoría de grafos serán objeto de estudio en este trabajo: centralidad de grado [81], centralidad de intermediación [25], centralidad de cercanía [28], centralidad de vector propio [30], excentricidad [29] y coeficiente de agrupamiento [26]. Como un punto adicional, se incluyó también la métrica de modularidad [82].

2.3.1. Centralidad de Grado

La centralidad de grado [10] es una métrica basada en la cantidad de nodos que forman un enlace con un nodo específico. Esto es, un nodo tomará más relevancia para la red mientras más nodos se conecten a él. Para describir este comportamiento de forma matemática, un estudio realizado en [81] ha propuesto la Ecuación 2.2.

$$DC(a_i) = \sum_{j=1}^n a(p_i, p_j) \quad (2.2)$$

donde $DC(a_i)$ representa el valor de centralidad de grado del nodo a_i . El índice i puede tomar valores de 0, 1, 2, ..., los cuales son identificadores de cada nodo dentro de la red. La matriz de adyacencia se representa como $a(p_i, p_j)$. Esta matriz es simétrica y binaria e indica el estado de enlace de una red [83]. Mediante esta matriz se pueden observar las conexiones existentes entre pares de nodos. Se representa con 1 la existencia de un enlace entre los nodos p_i, p_j y con 0 en caso contrario. La sumatoria de todos los enlaces establecidos dará como resultado el valor de métrica de grado del nodo a_i .

Para tener un mejor panorama de la centralidad de grado, se ha propuesto a manera de ejemplo la Figura 2.3. Esta figura contiene cinco nodos identificados por los números 0, 1, 2, 3 y 4. Junto con esta figura, se propone la Tabla 2.1. Esta tabla representa la matriz de adyacencia que se muestra en la Figura 2.3. Tanto en la Figura 2.3, como en la Tabla 2.1 se puede observar que los nodos 0 y 1 tienen el mayor valor de grado dentro de la red. En cambio el nodo 4 tiene menor valor de grado en la misma red. El valor de centralidad de grado de cada nodo se obtiene al sumar las filas o las columnas de la matriz de adyacencia, tal como se indica en la última fila y última columna de la Tabla 2.1.

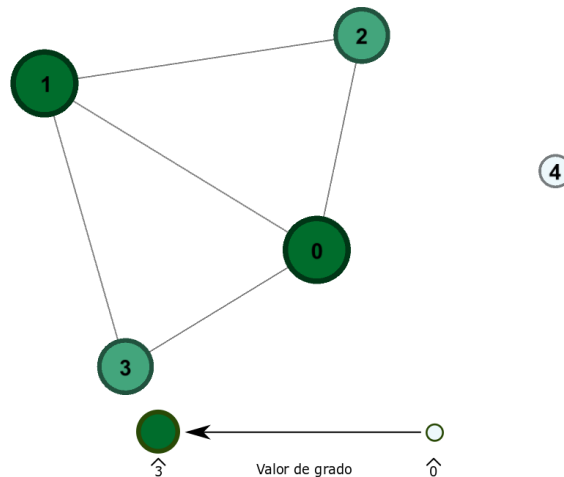


Figura 2.3: Grafo generado para demostrar la centralidad de grado. La diferencia de tamaños y colores en cada nodo indica el grado de relevancia para la red.

P_i, P_j	$P_{j=0}$	$P_{j=1}$	$P_{j=2}$	$P_{j=3}$	$P_{j=4}$	$DC(a_i)$
$P_{j=0}$	0	1	1	1	0	3
$P_{j=1}$	1	0	1	1	0	3
$P_{j=2}$	1	1	0	0	0	2
$P_{j=3}$	1	1	0	0	0	2
$P_{j=4}$	0	0	0	0	0	0
$DC(a_i)$	3	3	2	2	0	//

Tabla 2.1: Matriz de adyacencia tomada como ejemplo para el grafo de la Figura 2.3.

La Figura 2.4 por su parte ilustra un ejemplo de la métrica de centralidad de grado para una WMN con una topología más compleja.

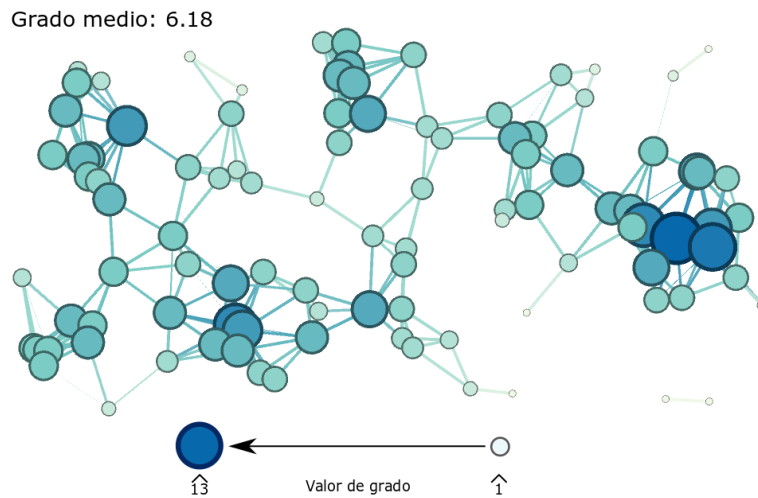


Figura 2.4: Ejemplo de la métrica de grado a una escala más compleja.

2.3.2. Centralidad de Intermediación

La centralidad de intermediación es una métrica que consiste en la medida de la frecuencia con la que aparece un nodo específico entre todas las rutas más cortas de la red. Al compararla con otras métricas, Freeman et. al. [25] definieron a la centralidad de intermediación como la más importante. Esta importancia se debe a que la métrica de intermediación ofrece información sobre enlaces claves dentro de las redes. Estos enlaces claves son usados, por ejemplo, para comprobar la robustez de las mismas. La variación fuerte de valor de intermediación entre los nodos indica una robustez de red débil [12]. El concepto de robustez será tratado a profundidad en la Sección 2.5.

Para entender mejor el concepto de intermediación, y su impacto en las WMNs, se ha propuesto la Figura 2.5. En esta se muestra diez nodos, numerados del 0 al 9. Se puede observar que el nodo 1 posee el mayor valor de intermediación. A medida que la red se expande, los nodos más lejanos van perdiendo valor respecto a la métrica de intermediación. Esto se debe a que las rutas más cortas no atraviesan dichos nodos. En cambio, los nodos centrales, poseen mayor valor de intermediación debido a que son utilizados para trazar las distancias más cercanas entre los nodos extremos y entre todos los nodos en general. Si los nodos extremos (nodos 1-6 y 7-9)

tuvieran enlaces directos entre sí, la centralidad de intermediación se repartiría de manera uniforme sobre toda la red. En la Figura 2.6 se muestra dicho caso. De las dos figuras anteriormente propuestas, la Figura 2.5 es un caso más realista. Las WMNs, por lo general, no tienden a generar enlaces entre todos los pares de nodos. La Figura 2.5 sirve para demostrar que a medida que se incrementan enlaces en la red, la métrica de intermediación se distribuye de forma más uniforme sobre los nodos.

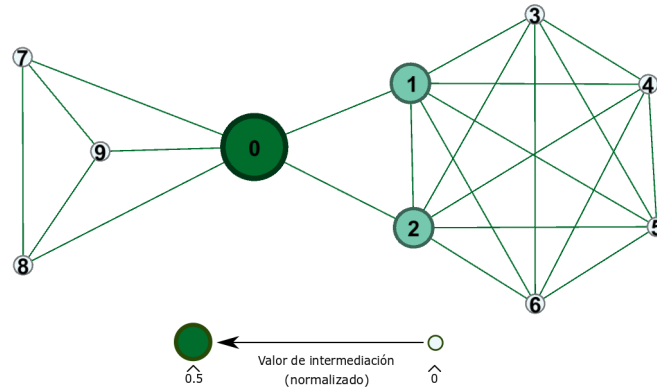


Figura 2.5: Grafo generado para representar la métrica de intermediación.

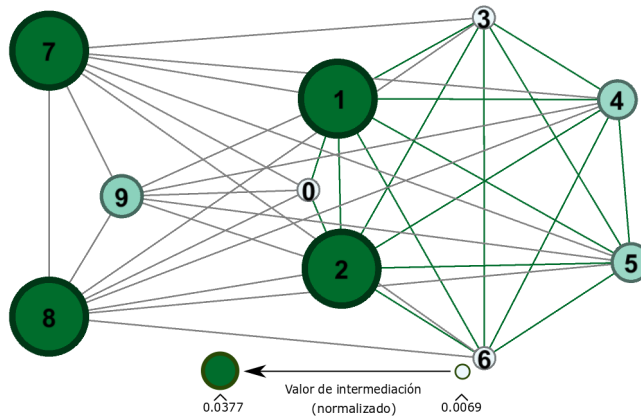


Figura 2.6: Grafo con la misma densidad de nodos que la Figura 2.5. Pero en este caso los nodos poseen una mayor cantidad de enlaces.

La centralidad de intermediación relaciona el camino más corto entre dos pares de nodos, respecto a todos los posibles caminos formados entre dichos pares de nodos. Matemáticamente está representado por la Ecuación (2.3).

$$BC_{a_i} = \sum_{j \neq i} \frac{sp_{j,k}(a_i)}{sp_{j,k}} \quad (2.3)$$

donde $sp_{j,k}$ es el número total de caminos más cortos entre dos pares de nodos, y $sp_{j,k}(a_i)$ indica el número de esos caminos que pasan a través del nodo a_i .

Para encontrar la centralidad de intermediación se aplica el algoritmo de búsqueda por amplitud [84].

Tomando dos nodos como referencia (un nodo origen y un nodo destino) se realiza un análisis sobre toda la red. Esto se hace con el objetivo de encontrar la ruta más corta entre dichos nodos [85]. Este proceso se repite para todos los pares de nodos posibles dentro del grafo. Cada vez que un nodo es tomado en consideración dentro de la ruta más corta entre dos pares de nodos, su valor es incrementado en 1.

Por último, en la Figura 2.7 se puede observar una WMN más compleja y realista. En ésta se puede observar que los nodos físicamente más céntricos de la red son quienes poseen mayor centralidad que los nodos extremos.

Longitud de camino medio: 6.07593

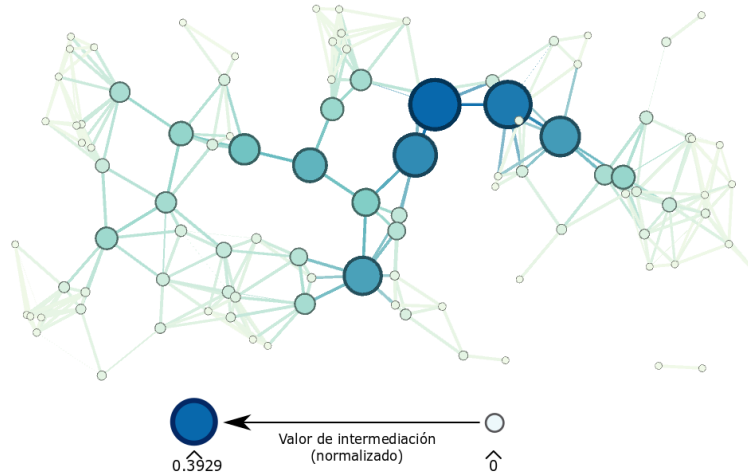


Figura 2.7: Ejemplo de la métrica de centralidad de intermediación a una escala más compleja.

2.3.3. Centralidad de Cercanía

La centralidad de cercanía [86] es una métrica basada en la distancia promedio entre pares de nodos de una red. Esta distancia promedio se calcula usando las distancias más cortas entre los pares de nodos. Basado en el uso de distancias, la centralidad de cercanía presenta una estimación del tiempo que tomaría en esparcir información sobre la red [79]. Esto con el objetivo de describir la eficiencia de propagación de la información. Al igual que la métrica de intermediación, el promedio de la distancia se la realiza haciendo uso del algoritmo de búsqueda por amplitud.

Para mejor comprensión de la centralidad de cercanía, se ha propuesto la Figura 2.8. En ésta se muestra una red con 10 nodos, numerados del 0 al 9. Esta red presenta tres nodos con valores altos de centralidad de cercanía: nodo 1, nodo 2 y nodo 3. Se puede observar que estos tres últimos tienen valores altos por ser nodos centrales. Esta asunción se debe al concepto de centralidad de red descrito en la Sección 2.3. Además, estos tres nodos son los más eficientes para la transmisión de la información, lo que significa que por estos circulará el mayor tráfico de la red.

La centralidad de cercanía, como se mencionó con anterioridad, hace uso de las distancias más cortas entre los pares de nodos. Este concepto puede ser descrito matemáticamente mediante la Ecuación (2.4).

$$C_{a_i} = \frac{1}{\sum_{j \neq i} distance(a_i, a_j)} \quad (2.4)$$

Esta Ecuación (2.4), descrita en [10], toma la suma de las distancias más cortas como el inverso del valor de centralidad de cercanía asignado a un nodo. Gracias a esta ecuación se puede observar nodos aislados en la red.

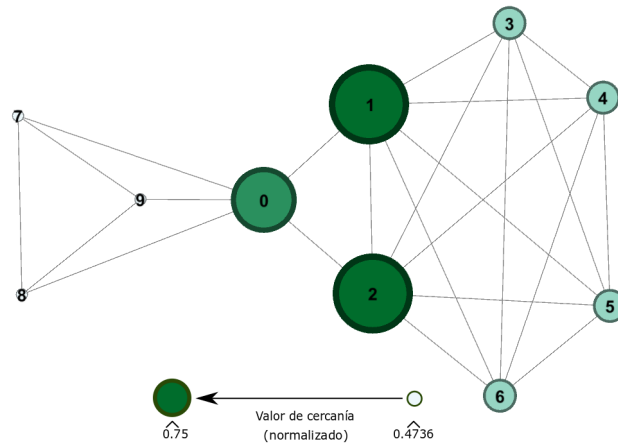


Figura 2.8: Grafo generado para ilustrar la métrica de cercanía.

Esto es, si la Ecuación (2.4) produce una indeterminación, entonces se podrá indicar un aislamiento de nodos [33].

A medida que las redes incrementan su tamaño, incrementa su complejidad de análisis también. Tal es el caso de la Figura 2.9. Esta red presenta un mayor grado de complejidad para realizar cálculos analíticos respecto al grafo de la Figura 2.8. Por tal razón, un análisis computacional es requerido para calcular el valor de cercanía de cada nodo.

Longitud de camino medio: 6.07593

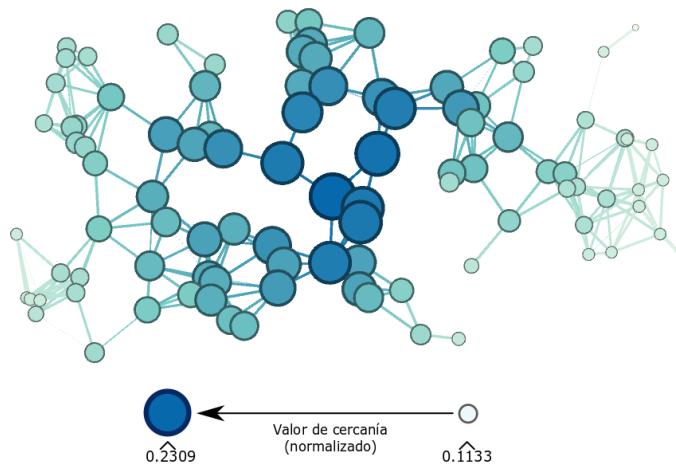


Figura 2.9: Ejemplo de la métrica de centralidad de cercanía a una escala más compleja.

2.3.4. Centralidad de Vector Propio

La métrica de centralidad de vector propio es la última métrica de la lista en utilizar la propiedad de centralidad de red. La centralidad de vector propio [30] tiene por objetivo medir la importancia de un nodo dentro de la red. Al igual que la centralidad de grado descrita en la Sección 2.3.1, la centralidad de vector propio usa los enlaces de un nodo como parámetro de referencia. El número de enlaces que posea un nodo, más el valor

de calidad que posean estos enlaces, otorgará un valor de centralidad de vector propio a un nodo [87]. La calidad de los enlaces se mide dependiendo del nodo al que se conecten. Si los enlaces se conectan a nodos con alto número de enlaces, entonces el enlace poseerá un alto grado de calidad.

Para mejor comprensión sobre la métrica de vector propio, se ha propuesto el ejemplo de la Figura 2.10. Dentro de este grafo, el nodo más importante es el nodo 0. Este nodo posee 4 enlaces, los cuales, tres de ellos (conectados a los nodos 1, 2 y 3), poseen un alto grado de relevancia sobre la red. A medida que se va ramificando el grafo, los nodos van perdiendo contacto con los nodos más relevantes, lo que, en términos de centralidad de red, indica que van siendo menos relevantes.

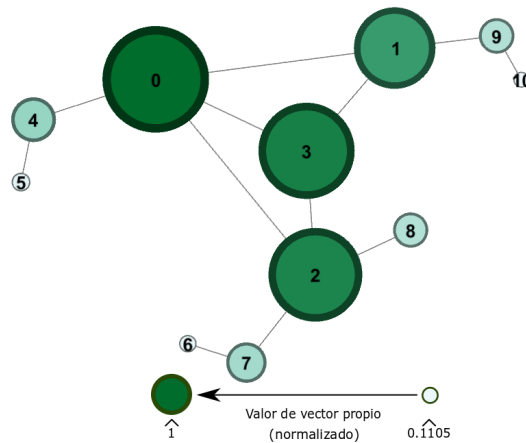


Figura 2.10: Grafo generado para representar la métrica de vector propio.

Hasta ahora, se ha definido que la centralidad de vector propio toma en consideración el número de enlaces, y su calidad, para asignar valores a sus nodos. Esta definición ha sido descrita matemáticamente por [88] mediante la Ecuación (2.5), y en forma matricial mediante la Ecuación (2.6).

$$x_k = \frac{1}{\lambda} \sum_i a_{i,j} x_i \quad (2.5)$$

$$\mathbf{Ax} = \lambda \mathbf{x} \quad (2.6)$$

Tanto la Ecuación (2.5) como la Ecuación (2.6) hacen uso de dos parámetros importantes: el primero es la matriz de adyacencia, la cual se ha descrito en la Sección 2.3.1. El segundo parámetro, λ , describe los valores propios necesarios para la obtención de la métrica de vector propio. El valor de λ , en ambas ecuaciones, toma valores dentro del rango (0,1]. Los nodos con valores más cercanos a 1 indicarán mayor relevancia sobre la red que los nodos con valores más cercanos a 0. El valor cero (0) no se incluye dentro del rango, debido a que este valor indicaría nodos aislados. Los nodos aislados no son analizados mediante esta métrica, pero sirven de apoyo para verificar la integridad de red [12].

Dentro de motores de búsqueda como Google, y en redes sociales como Twitter [89], que son redes de alta densidad de nodos, la métrica de vector propio se hace presente [90]. Tal es el caso de la red de la Figura 2.11 que muestra un ejemplo gráfico de la métrica de vector propio a mayor escala.

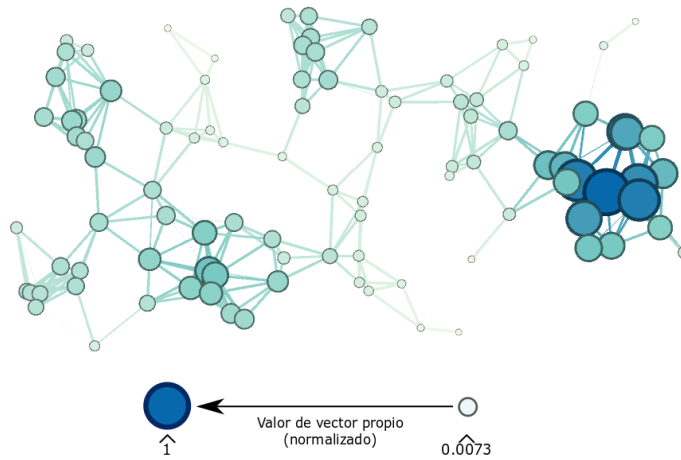


Figura 2.11: Ejemplo de la métrica de centralidad de vector propio a una escala más compleja.

2.3.5. Coeficiente de Agrupamiento

El coeficiente de agrupamiento es una métrica que se basa en la propiedad de densidad de nodos. Mediante esta propiedad, la métrica de coeficiente de agrupamiento mide el estado de conectividad de los vecinos de un nodo [26]. Para lograr este cometido, dicha métrica se basa en el concepto de **triángulos**. Un triángulo se forma a partir del enlace entre un nodo con sus vecinos y un enlace entre sus vecinos. La Figura 2.12 muestra triángulos formados por el nodo 0 con los nodos 1, 2, 3 y 6. Como se puede observar, el nodo 0 forma enlaces con los nodos 1, 2, 3 y 6; a su vez, estos nodos forman enlaces entre sí, generando cuatro triángulos alrededor del nodo 0. Además del número de triángulos, el coeficiente de agrupamiento ocupa la métrica de grado (Sección 2.3.1) como parámetro de normalización.

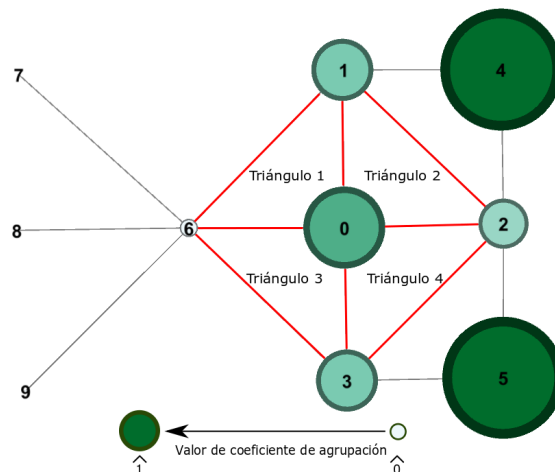


Figura 2.12: Grafo generado para representar la métrica de coeficiente de agrupamiento.

Matemáticamente, el número de triángulos se relaciona con el valor de centralidad de grado $DC(a_i)$ mediante la Ecuación (2.7). Esta relación da como resultado el valor de coeficiente de agrupamiento $CC(a_i)$ en un nodo.

La Ecuación (2.7) ha sido obtenida mediante estudios realizados en [91, 92].

$$CC(a_i) = \frac{\#triangulos}{DC(a_i) * (DC(a_i) - 1)} \quad (2.7)$$

Esta Ecuación (2.7) tiene una restricción de valores resultantes. Esta restricción se debe a que el valor de grado de un nodo será siempre mayor al número de triángulos establecidos alrededor de un nodo [92]. Por tanto, el coeficiente de agrupamiento entregará resultados entre los valores [0,1].

A medida que incrementa el número de nodos, la probabilidad de enlazarse y formar triángulos entre nodos incrementa. Los nodos más cercanos entre sí aumentan la posibilidad de incrementar el valor de coeficiente de agrupamiento. Esta asunción se debe a que el coeficiente de agrupamiento es una métrica basada en la propiedad de densidad de nodos. Como ejemplo de esta observación, se tiene la red de la Figura 2.13.

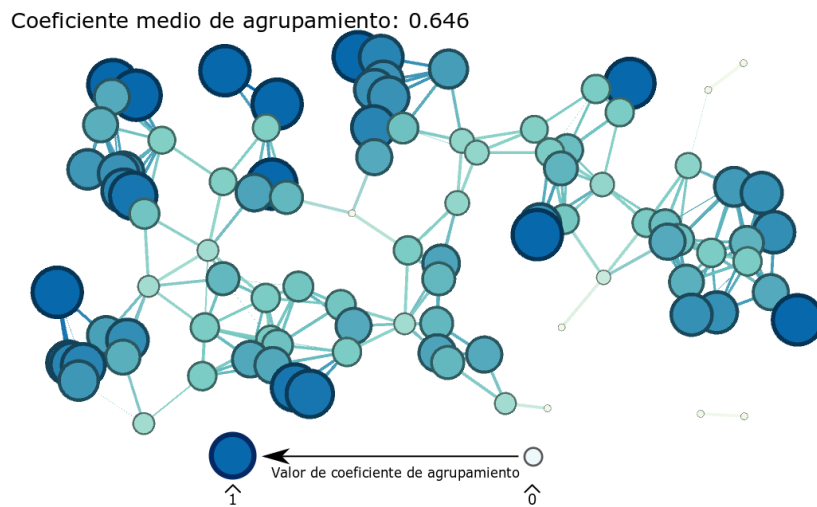


Figura 2.13: Ejemplo de la métrica de coeficiente de agrupamiento a una escala más compleja.

2.3.6. Excentricidad

La excentricidad [29] es una métrica basada en la propiedad de distancias entre nodos, la cual se ha descrito en la Sección 2.3. Mediante esta propiedad, La excentricidad mide las distancias, más largas y más cortas, que se forman entre pares de nodos dentro de una red. [93–95]. A las distancias más largas se las denomina **diámetro** y a las distancias más cortas se las denomina **radio**. La métrica de excentricidad está aplicada a nodos con un valor de centralidad de grado mínimo 1. Para los nodos con valor de centralidad de grado igual a 0 (nodos aislados), el valor de excentricidad se lo considerará infinito [29].

El concepto de excentricidad se describe de forma gráfica mediante el ejemplo de la Figura 2.14. Aquí se puede observar un grafo con ocho nodos numerados del 0 al 7. Los nodos 0 y 1 son los que tienen mayor valor de excentricidad en la red. Dentro de la misma figura, se ha señalado el camino más largo y más corto para el nodo 1. Estos caminos toman en consideración el número de saltos. El diámetro tiene un valor de 5 y el radio un valor de 3.

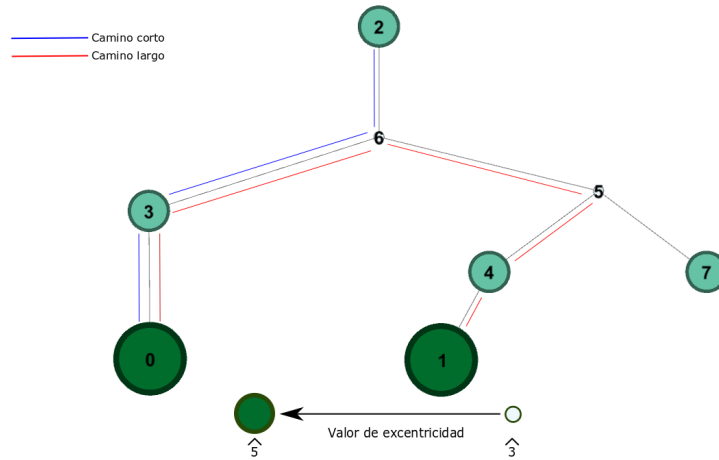


Figura 2.14: Grafo generado para representar la métrica de excentricidad.

Matemáticamente, el diámetro y el radio están descritos por las Ecuaciones (2.8) y (2.9) respectivamente.

$$diam(a_i) = max_{distance}(a_i, a_j) \quad (2.8)$$

$$rad(a_i) = min_{distance}(a_i, a_j) \quad (2.9)$$

De la Ecuación (2.8), el parámetro $max_{distance}(a_i, a_j)$ hace referencia a la distancia más larga entre los pares de nodos a_i y a_j . En cambio, de la Ecuación (2.9), el parámetro $min_{distance}(a_i, a_j)$ hace referencia a la distancia más corta entre los pares de nodos a_i y a_j .

Los pares de nodos, con los que se trazan las rutas más largas, son generalmente nodos que se encuentran a los extremos de la red. Tal como se puede observar en la Figura 2.15, los nodos a los extremos de la red son los que tienen mayor valor de excentricidad que los nodos que se encuentran al centro de la red.

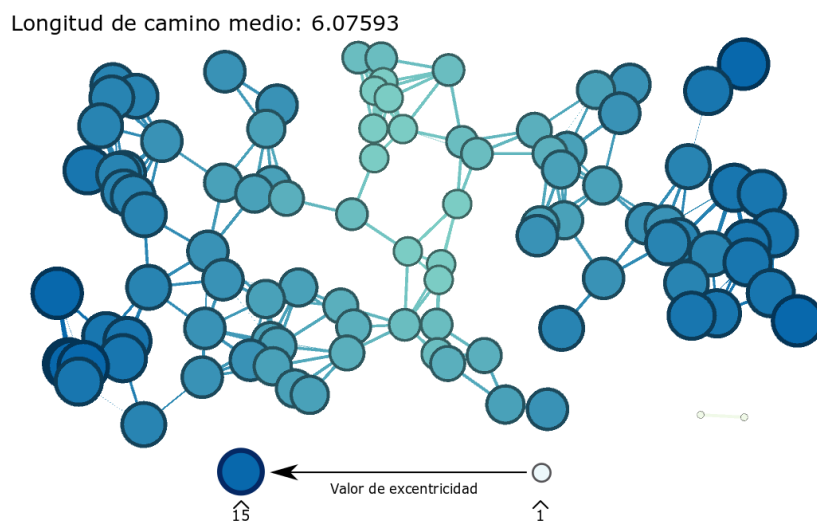


Figura 2.15: Ejemplo de la métrica de excentricidad a una escala más compleja.

2.4. Modularidad

La modularidad es una métrica basada en el concepto de mundo pequeño, *Small-World* [66]. Esta métrica especifica que el comportamiento de un grafo puede ser descrito mediante fragmentos. Estos fragmentos se obtienen al particionar el grafo. Esta partición ofrece la posibilidad de realizar análisis más simples sobre cada uno de los fragmentos, lo que al final permitirá obtener una visión global del comportamiento del grafo. Estos fragmentos, que se obtienen al dividir la red, son comúnmente conocidos como **comunidades**.

Para poder establecer comunidades dentro de un grafo, se debe hacer uso del concepto de modularidad. La modularidad indica el grado en el que se ha de fragmentar un grafo. Esto con el objetivo de obtener cierta cantidad de comunidades. El valor de modularidad Q es una métrica global de la red, la cual está descrita por la Ecuación (2.10) [27].

$$Q = \frac{1}{2e} \sum_{i,j} \left[a(p_i, p_j) - \frac{D_C(a_i) * D_C(a_j)}{2e} \right] \delta(c_i, c_j) \quad (2.10)$$

En esta Ecuación (2.10) se tiene que el valor e corresponde al número de enlaces (totales) dentro de la red, $a(p_i, p_j)$ corresponde a la matriz de adyacencia, $D_C(a_i)$ y $D_C(a_j)$ representan las centralidades de grado de los nodos a_i y a_j respectivamente. El parámetro $\delta(c_i, c_j)$ corresponde a una función delta, la cual indicará a qué comunidad pertenece cada nodo dependiendo de los valores c_i y c_j (cuando la comunidad c_i y la comunidad c_j sean iguales, indicarán que el nodo pertenece a una comunidad, caso contrario, el nodo no pertenece a dicha comunidad).

Para entender el funcionamiento de la métrica de modularidad, se hace uso del ejemplo de la Figura 2.16. Este grafo muestra 4 comunidades obtenidas mediante el software Gephi. Para lograr este objetivo, Gephi hace uso del algoritmo descrito en [96]. Este algoritmo requiere de un parámetro de entrada denominado **resolución** [97]. Por defecto, el valor de resolución se coloca en 1. Si la resolución se coloca en un valor menor que 1, el resultado de la partición ofrece un número reducido de comunidades. En cambio, si la resolución se coloca en un valor mayor que 1, el resultado de la partición ofrece un número amplio de comunidades.

Si se observa el grafo de la Figura 2.16, las comunidades se forman entre nodos cercanos. Mientras mayor número de conexiones tenga un nodo, mayor será la probabilidad de que el mismo pueda formar parte de una comunidad [32].

La modularidad Q puede adquirir cualquier valor real. Mientras más grande sea el valor obtenido por Q , mayor número de comunidades se generarán en el grafo. Cabe notar que el número de comunidades máxima que se puede formar en una red, está ligado al número total de nodos existentes sobre la misma.

Esta última métrica ha sido descrita por cuestiones de completitud. Su finalidad, dentro de este estudio, será la de proporcionar una metodología diferente a la robustez de red. El proceso donde se utiliza la métrica de modularidad se describe en la Sección 4.2.

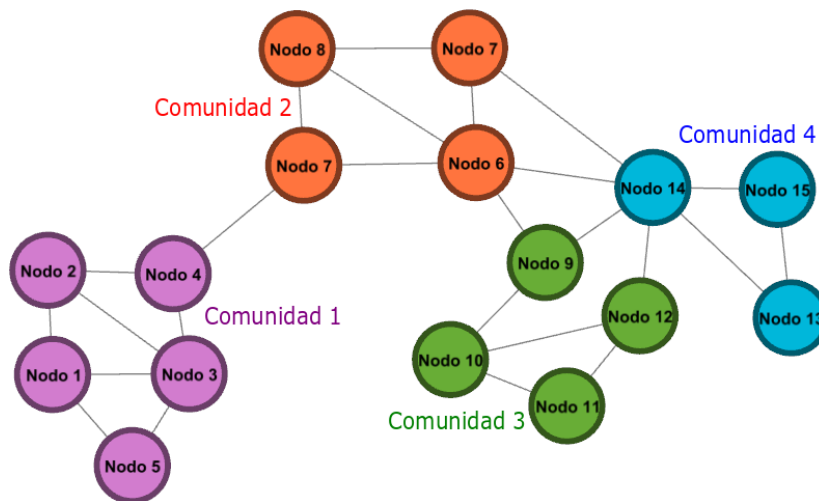


Figura 2.16: Red de ejemplo que indica la cantidad de comunidades generadas a partir de un grafo. Estas comunidades se las ha obtenido usando un valor de 1 en la resolución. El valor de modularidad adquirido para este caso es de 0.503.

2.5. Robustez de red

La robustez de red [98] es un concepto basado en la conectividad de los nodos. Este concepto está ligado a la cantidad de enlaces dentro de la red. Mientras más enlaces existan entre pares de nodos, más robusta será la red [99]. En entornos ideales, una WMN completamente robusta indicaría una conectividad total de la red. Esta conectividad total implicaría enlaces directos entre todos los pares de nodos. En la práctica, los nodos de las WMNs no forman enlaces con todos los miembros, sino con sus vecinos más cercanos [3].

La robustez de una red puede verse afectada por varios factores. Entre los casos más estudiados se encuentra el desprendimiento de nodos [32]. Al desprenderse un nodo de la red, consigo se eliminan enlaces importantes. Dependiendo del grado de relevancia del nodo para la red, los enlaces que se eliminarán junto con el nodo afectarán, en mayor o menor medida, al conjunto de la red.

El desprendimiento de nodos depende de la actividad de los mismos sobre la red. En situaciones reales, los nodos no siempre permanecerán activos. Esto dependerá de varios factores: energéticos, distancias, sobrecarga de paquetes, etc [98, 100].

Como se ha mencionado con anterioridad, el desprendimiento de nodos afectará a la red, dependiendo cuán relevante es dicho nodo para la misma. Es aquí donde entra en juego el uso de las métricas de teoría de grafos, descritas en la Sección 2.3. Para entender el rol de las métricas de teoría de grafos dentro de la robustez de red, se ha propuesto los ejemplos de las Figuras 2.17, 2.18 y 2.19. En las dos primeras se muestran dos casos de nodos desprendidos de forma aleatoria. En cambio, en el tercer caso, se describe el desprendimiento de nodos con mayor índice en la métrica de grado. Al comparar las Figuras 2.17 y 2.18 con 2.19, se observa que el desprendimiento de nodos genera escenarios más críticos al usar métricas de teoría de grafos. Estos resultados se observan al comparar el **grado medio** en cada una de las redes. Para todos los casos se ha desprendido un total de cinco nodos.

El impacto que genera el desprendimiento de un nodo, haciendo uso de las métricas de teoría de grafos, resulta mucho más fuerte que el desprendimiento de nodos de forma aleatoria [32, 101–103]. Por lo tanto, las métricas de teoría de grafos juegan un papel importante dentro de las WMNs; pues las mismas identifican los nodos que son, jerárquicamente, más relevantes.

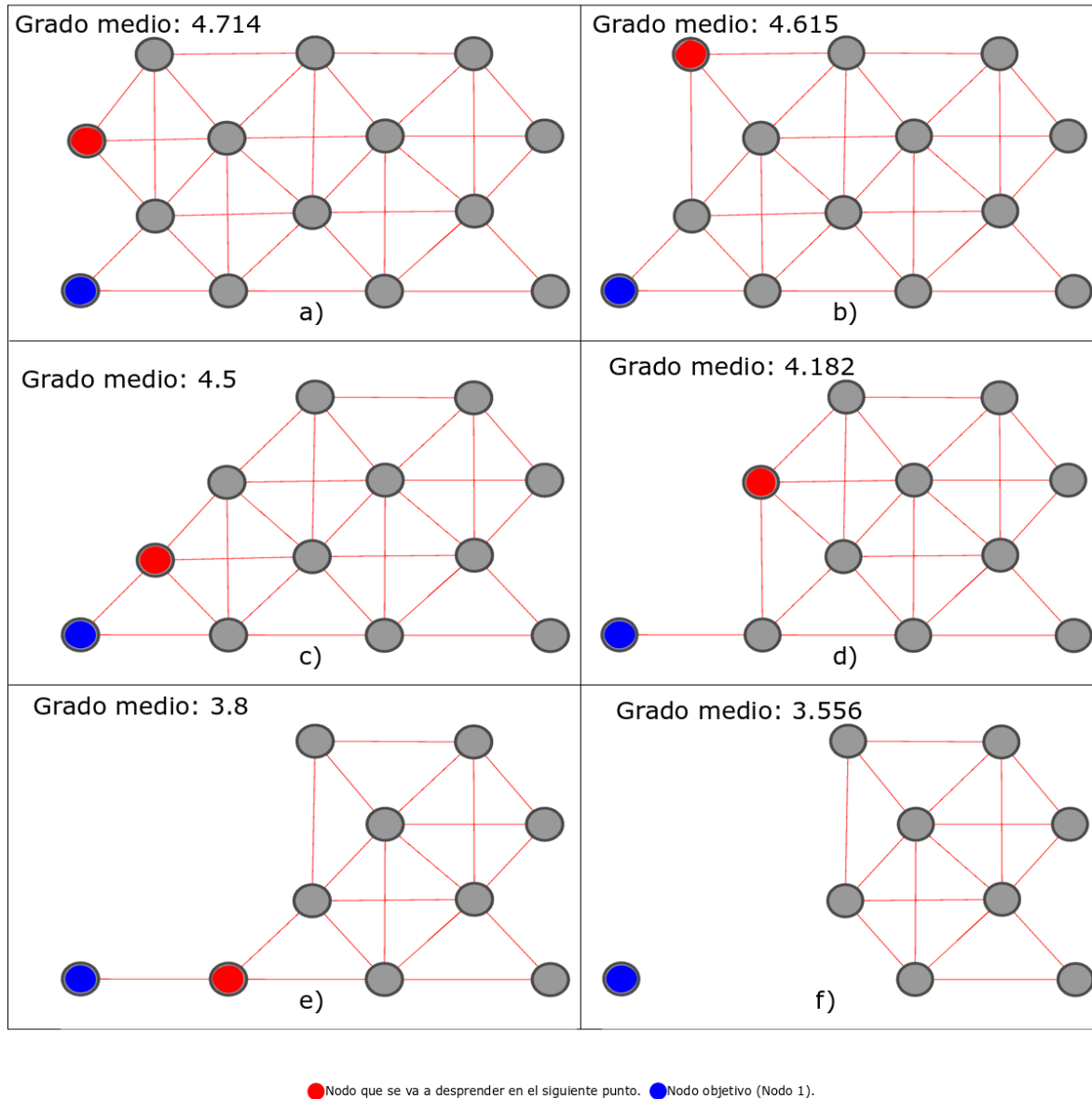


Figura 2.17: Grafo generado para representar el desprendimiento de nodos de forma aleatoria. En este caso se puede observar que el resultado final ha sido un nodo aislado de la red.

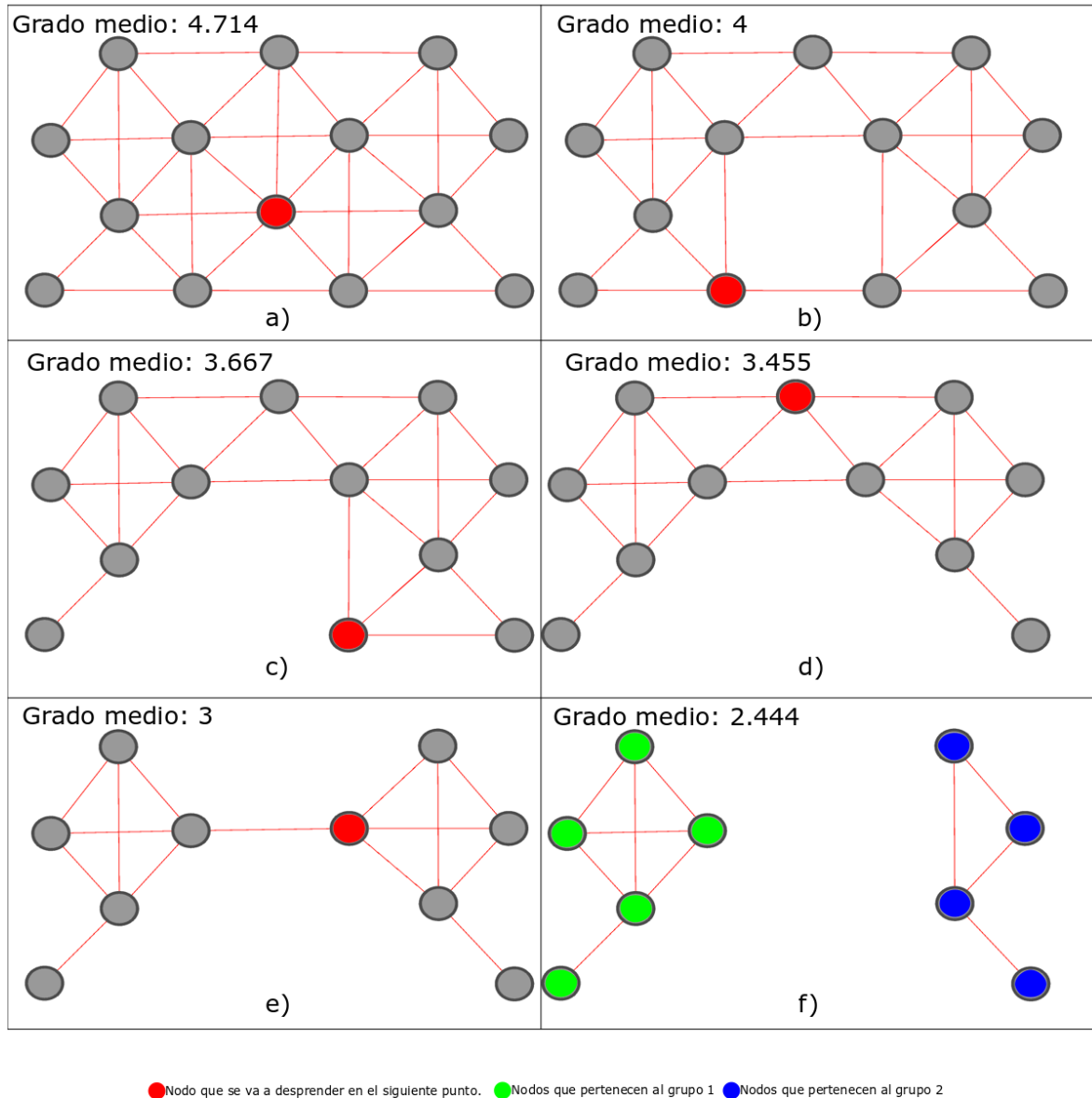


Figura 2.18: Grafo generado para representar el desprendimiento de nodos de forma aleatoria. En este caso se puede observar que el resultado final tiene dos fragmentos de red.

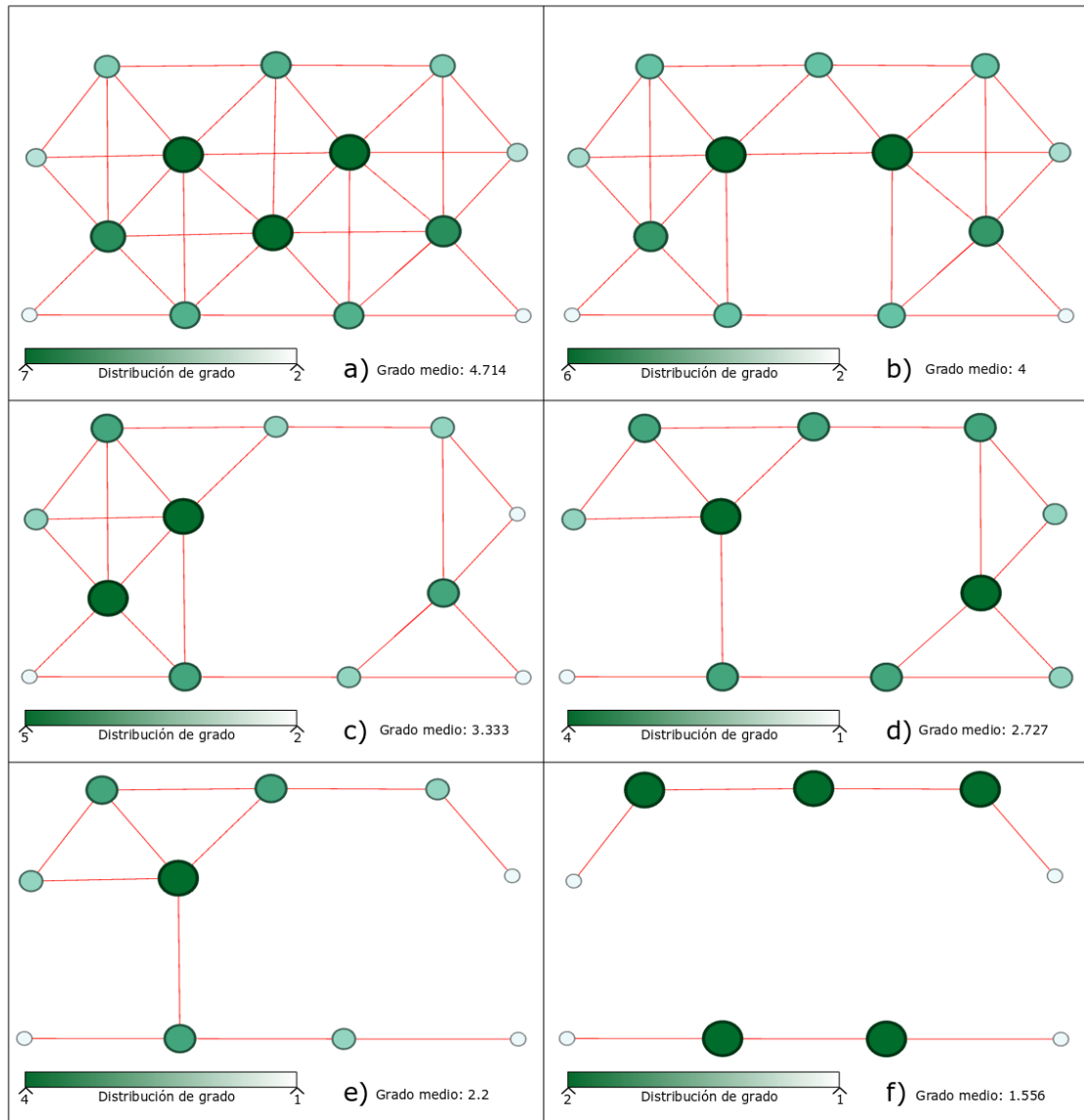


Figura 2.19: Grafo generado para representar el desprendimiento de nodos. En este caso se ha usado la métrica de centralidad de grado para el desprendimiento de nodos. El resultado final de este caso, presenta un impacto más crítico que el observado en los desprendimientos aleatorios (Figuras 2.17 y 2.18).

2.6. Aplicaciones en redes en malla

En esta sección se tratará dos aspectos importantes de las redes en malla: la robustez y el flujo de información a través de la misma. La robustez se enfoca en el estado de los enlaces existentes en los nodos de la red. Mediante este concepto se indicará qué consecuencias, en términos de comunicación, sufrirá la red con la pérdida de enlaces entre los nodos [32]. Por otro lado, el flujo de información en la red permite observar la cantidad de paquetes enviados y recibidos, así como el retardo de los paquetes que se han entregado. Para ello, se hacen uso de las métricas de PDR y retardos [104, 105].

La robustez de red es un concepto ligado a la seguridad. La presencia de agentes externos, sean estos intrusos o interferencias con otras tecnologías de radio, perjudica el correcto funcionamiento de la red. Al momento que uno de estos agentes externos se incorpora, los nodos operarán bajo condiciones inapropiadas para correcto funcionamiento, donde uno de los casos más críticos resulta con la expulsión de uno de los nodos fuera de la red. Para garantizar la seguridad, distintos protocolos han sido propuestos [106–108]. Estos protocolos reducen la probabilidad de perder nodos en la red de forma significativa. El enfoque de estos protocolos de seguridad está orientado a WMNs, y se basa en el estándar 802.11. Esto debido a que las WMNs cuentan con tecnologías de radio que son mucho más propensas a recibir ataques en comparación con las redes cableadas. Estas tecnologías transmiten información mediante difusión, lo cual da lugar a un sin fin de vulnerabilidades en la red que deben ser tomadas en consideración. Además, las WMNs no son redes estables, debido a que usan tecnologías de radio. Estas dependen del medio de propagación. Si el medio se encuentra en condiciones óptimas, sin obstáculos ni ruido, la comunicación será fiable. Pero no siempre se encuentran las condiciones ideales para el correcto funcionamiento, lo cual lleva a perder fiabilidad en la transmisión de datos.

Para este estudio, se enfocará en uno de los casos más críticos dentro del concepto de robustez de red, el cual consta del desprendimiento de nodos. El desprendimiento de nodos afecta significativamente el rendimiento de la red, tal como se ha podido observar en [106–108]. Al desprender nodos de la red, no solo el estado de enlaces (número total de enlaces en la red) resulta afectado, sino también el PDR y el retardo juegan un papel muy importante [109–111]. De esta manera, los nodos desprendidos afectarán en mayor, o menor, medida en el flujo de información en la red. Además, se plantearon casos concretos para el desprendimiento de nodos. Estos casos involucraron el uso de las métricas de teoría de grafos. Entonces, para desprender un nodo de la red, se escogerá el nodo con mayor valor de métrica (grado, intermediación, cercanía, coeficiente de agrupamiento, vector propio y excentricidad), con el objetivo de verificar cuan fuerte resulta el impacto tras la eliminación de dicho nodo en específico.

Trabajos Relacionados

En los últimos años, el análisis de redes inalámbricas, mediante el uso de métricas de red y de teoría de grafos, ha despertado gran interés dentro de la comunidad científica. Esto se debe a que mediante estas métricas se puede obtener información relevante sobre la topología general de la red y la relación con su operación y mantenimiento. Esto a su vez permite identificar posibles mejoras y optimizaciones que se pueden realizar con el fin de incrementar el rendimiento y la operación general de la red. Adicionalmente estas métricas pueden exponer posibles puntos débiles que se puedan presentar en los diseños de las mismas.

Uno de los ejemplos de posibles debilidades de las redes inalámbricas en general está relacionado con el estudio de integridad y robustez de red. Bhattarai et. al. en [103], realizaron un estudio de integridad y robustez sobre redes móviles de cuarta generación, *Long Term Evolution (LTE)*. Este estudio evalúa tres métricas de red: carga útil (*throughput*), retardos extremo-extremo, (*end-to-end delay*), y tasa de entrega de paquetes (*PDR*). En base a estas métricas, se planteó un **espacio de ataque**, el cual consistió en el desprendimiento de los nodos de la red. Este desprendimiento sucedía una vez que empezaba a colapsar la red, como producto de la sobrecarga de información introducida por dispositivos a los que se les denominó **interceptores**. Estos interceptores se colocaron en la red bajo cuatro escenarios distintos: despliegue óptimo de interceptores con ataques coordinados, despliegue óptimo de interceptores con ataques no-coordinados, despliegue no-óptimo de interceptores con ataques coordinados y despliegue óptimo de interceptores con ataques no-coordinados. La diferencia entre los ataques coordinados y no-coordinados dependía de la sincronización de los ataques realizados. En tanto que, el despliegue óptimo y no-óptimo hacía referencia a la ubicación geográfica de los interceptores. Al final, se demostró que los ataques óptimos-coordinados resultaron ser mucho más efectivos que los otros escenarios planteados, demostrando que la ubicación de los interceptores influía, en gran medida, el éxito del desprendimiento de los nodos.

El concepto de centralidad, introducido por las métricas de teoría de grafos [80], indica que la posición geográfica de los nodos influye en el comportamiento general de la red. Para corroborar la importancia de la centralidad dentro de la teoría de grafos, Cetinkaya et. el., en [112], realizaron un estudio sobre *WMNs* que involucró el uso de dos métricas de centralidad: grado e intermediación. Empleando *NS-3* como software de simulación de redes, este estudio recreó un escenario conformado por nodos e interceptores. Al igual que Bhattarai et. al., se hicieron uso de interceptores para desprender nodos de la red. Para lograr este cometido, se propusieron tres escenarios: el primero se basó en el desprendimiento aleatorio de nodos en la red, para lo

cual se colocó a los interceptores de forma aleatoria sobre la misma. El segundo se basó en el desprendimiento de nodos en base a la métrica de grado, en este caso, los interceptores se colocaron cerca de nodos con alto índice de centralidad de grado. De esta forma, estos interceptores impedían el correcto funcionamiento de los nodos sobre la red, provocando que se aislaran de la misma. Por último, y similar al segundo escenario, se realizó un desprendimiento de nodos basado en la métrica de intermediación. Gracias a este estudio se verificó la importancia de las métricas de centralidad para considerar diseños de redes inalámbricas. Tanto el estudio de Bhattarai et. al., como el de Centinkaya et. al., se realizaron en torno a redes basadas en infraestructuras fijas.

Muchos estudios sobre WMNs se enfocan en el análisis de integridad y robustez de red mediante el uso de métricas de teoría de grafos [32, 113–118]. Esto se debe a que las interconexiones entre dispositivos son, generalmente, conexiones inalámbricas. Estas conexiones tienen muchas limitantes, entre las cuales encontramos el rango de operación, el uso de baterías, interferencia entre canales, entre otras. Pero, uno de los problemas más importantes dentro de las WMNs gira en torno a la integridad y robustez de red. Estudios como los de Bhattarai et. al. y Cetinkaya et. al. se enfocaron en estos conceptos, demostrando la importancia de las métricas de teoría de grafos. Los escenarios más destructivos se produjeron al incluir el análisis con las métricas de grado e intermediación. Estudios posteriores, como el de Barabasi en [32] y Backhaus et. al. en [119], destacan la importancia de la métrica de grado, bajo el concepto de integridad y robustez de red. Barabasi, mediante un ejemplo experimental, genera un grafo de forma aleatoria. A partir del primer momento, el autor establece valores de centralidad de grado para cada nodo dentro de esta red. De forma consecutiva, se empieza a desprender uno por uno los nodos con alto valor de centralidad de grado. El resultado obtenido es una red fragmentada, con nodos aislados que impiden la comunicación con el resto de miembros. Bajo las mismas condiciones, Barabasi realizó un desprendimiento de nodos de la red de forma aleatoria, sin considerar métricas de teoría de grafos. Los resultados, al comparar el desprendimiento de nodos mediante la métrica de grado y de forma aleatoria, indicaron que los desprendimientos producidos en base a la métrica de grado generan escenarios más destructivos que los desprendimientos realizados de forma aleatoria. Por otro lado, Backhaus et. al. propusieron un estudio basado en la métrica de grado usando una red generada en [120]. La evaluación se realizó con la finalidad de proponer un nuevo protocolo de enrutamiento, que sea capaz de mantener la integridad de la red a medida que incrementa su tamaño, para lo cual, se consideró los nodos con mayor índice de centralidad de grado. Basado en esta métrica, se establecieron análisis de los parámetros de red como retardo y volumen de información sobre dos contextos: local y global. Los resultados locales indicaban el incremento de retardo e información entre los nodos vecinos, mientras que los resultados globales se enfocaban en toda la red.

De los 4 estudios previamente analizados, ninguno en particular se ha enfocado en el análisis de redes con el uso de modelos de movilidad realistas. Hasta el momento, estos estudios han presentado escenarios con topologías definidas o aleatorias. Zhang et. al. en [114] intenta romper el esquema de movilidad aleatoria, incluyendo un modelo más realista denominado Markov-Gaussiano, que, a pesar de basarse en modelos matemáticos definidos, tiende a compartir similitudes con el modelo de movilidad RWP [14]. La utilización de modelos de movilidad aleatorios supone escenarios que podrían perjudicar la veracidad de los resultados, tal como se definió en [38]. Esto se debe a que los dispositivos móviles son cargados por personas, las cuales se ha demostrado, en [1, 2], que no generan patrones de movilidad aleatorios.

De todos estos estudios descritos, sobre redes inalámbricas, ninguno en particular se ha enfocado en el uso de modelos de movilidad realistas [56, 121]. Estos modelos pretenden simular topologías de redes dinámicas que, a diferencia de los estudios ya mencionados, permiten generar movilidad en los usuarios de la red, utilizando patrones de movilidad basadas en el comportamiento humano. Una de las mayores ventajas de trabajar con topologías dinámicas, es la cantidad de experimentos que pueden realizarse sobre las mismas. Pero, como

ha sido mencionado por [119], la carga computacional de trabajar con topologías dinámicas es bastante alta. Por este motivo se opta por trabajar con topologías basadas en eventos discretos [122–124]. Trabajar con eventos discretos aún supera al trabajar con topologías definidas, pues en cada evento discreto se obtendrá una nueva topología, producto del movimiento de los nodos. Además, el uso de simuladores para la generación de topologías dinámicas permite variar distintos parámetros, siendo uno de los más importantes la **densidad de nodos** sobre la red. Al variar el número de nodos sobre la red, se puede plantear escenarios escalables sobre cualquier topología.

Varias metodologías han sido expuestas para el estudio de redes inalámbricas dentro de la comunidad científica. La integridad y robustez de red descrita en los apartados anteriores ha sido una de ellos. Pero, dentro del vasto mundo de las redes inalámbricas, existen muchos estudios en otras áreas, entre las cuales, una de especial interés, es el retardo provocado por la transmisión de la información [125–128]. Shi et. al. en [125] establecen una medida del retardo en la red, en la que los usuarios finales resultan afectados por la escalabilidad de la misma. A medida que la red crece, la demanda de información transmitida también aumenta. Por consiguiente, los retardos para enviar la información sobre la red se consideran un factor importante.

En base a todo lo expuesto en este apartado, se ha planteado realizar un estudio de modelos de movilidad realistas, obtenidos de simuladores como BM [56] y SUMO [121]. Estos modelos de movilidad generan trazas realistas, que han de ser comparadas utilizando métricas de teoría de grafos. La comparación de estos modelos de movilidad permitirá verificar si las topologías generadas, en cada caso, presentan resultados similares o diferentes. En caso de presentar resultados diferentes, se medirá que tanta diferencia existe al usar una métrica u otra. Para ello, se plantea, como en [32, 114], una variación de nodos. Al final se extraen los mejores y peores resultados, obtenidos por los modelos de movilidad, en cada métrica. Luego de obtener estos resultados, se procede a comparar las métricas de teoría de grafos bajo los conceptos de integridad y robustez de red. Siguiendo la metodología de [32, 112, 119, 129], se desprenderán un conjunto de nodos de la red. Este desprendimiento se lo realizará sobre los modelos con mejores y peores resultados de cada métrica. Esto se realizará con el objetivo de analizar que tanto impacto puede llegar a generar un desprendimiento de nodos usando un modelo de movilidad u otro, bajo la misma métrica. Aunque solo exista estudios de integridad y robustez de red usando métricas de grado, intermediación y cercanía [114–117], se pretende extender el uso de métricas como vector propio, excentricidad y coeficiente de agrupamiento.

Metodología

En este capítulo se explicará la metodología aplicada para obtener datos respecto a los modelos de movilidad, las métricas de teoría de grafos y la robustez de red. Para ello, este capítulo fue dividido en dos apartados. El primer apartado, el cual se denomina **obtención de métricas de teoría de grafos**, se enfoca en la adquisición de datos referente a las métricas de teoría de grafos, propuestas en la Sección 2.3. Para lograr este cometido se describirá, en primer lugar, la generación de cada uno de los modelos de movilidad descritos en la Sección 2.2. El segundo apartado, el cual se denomina **evaluación del desempeño de la red**, se enfoca en la adquisición de datos referente al rendimiento de WMNs, bajo el concepto de integridad y robustez de red. En este apartado se ocuparon los distintos modelos y métricas obtenidos en el primer apartado. Además, se propone diferentes metodologías para determinar el impacto de las métricas estudiadas en las WMNs.

La metodología usada para las métricas de grado, intermediación y coeficiente de agrupamiento, están basadas en los trabajos [1, 130, 131].

4.1. Obtención de las métricas de teoría de grafos

Este apartado hace énfasis en el procedimiento utilizado para la obtención de las métricas de teoría de grafos. Para lograr este cometido, se han definido los siguientes puntos:

- La generación de trazas de movilidad usando modelos sintéticos.
- La obtención de la matriz de adyacencia y matriz de costes.
- La obtención de métricas de teoría de grafos.

4.1.1. Generación de las trazas de movilidad usando modelos sintéticos

Como primer punto se tiene la generación de trazas de movilidad usando modelos sintéticos. Cada modelo, descrito en la Sección 2.2, genera trazas con un comportamiento acorde a los valores proporcionados en los parámetros de entrada. Existen parámetros de entrada generales y específicos. Los parámetros de entrada generales se describen en la Tabla 4.1. Por su parte, los parámetros específicos se definen en los apartados de cada modelo de movilidad correspondiente. Todos estos parámetros han sido sintonizados usando las plataformas

BM [56] y SUMO [121]. BM se ocupó para generar trazas con los modelos SWIM, SMOOTH, SLAW, Área de Desastre y RWP. Por su parte, SUMO se utilizó para generar trazas con el modelo de Restricciones Geográficas.

Parámetro	Argumentp	Valor
Tiempo de simulación:	-d	500 segundos
Número de nodos:	-n	50-100-150 unidades
Ancho del área de simulación:	-x	1040 metros
Alto del área de simulación:	-y	520 metros
Profundidad área de simulación:	-z	0 metros

Tabla 4.1: Parámetros de entrada generales para los modelos de movilidad.

Los valores mostrados en la Tabla 4.1 han sido obtenidos de estudios realizados en [2]. El parámetro **Número de nodos** se lo usa con tres valores, los cuales corresponden a 50, 100 y 150. Esto se hizo con el objetivo de plantear tres escenarios con distintas densidades de nodos para evaluar cada modelo de movilidad.

Como se mencionó con anterioridad, cada modelo de movilidad tiene parámetros específicos. Por tal razón a continuación se indicarán dichos parámetros para cada caso.

4.1.1.1. Escenario SWIM

El modelo de movilidad SWIM fue simulado usando parámetros específicos descritos en la Tabla 4.2. Este modelo de movilidad representa un comportamiento de familiaridad e interacción social de los nodos vecinos más cercanos. Este comportamiento fue descrito de forma teórica en la Sección 2.2.2.

Parámetro	Argumento	Valor
Rango de transmisión del nodo:	-r	0.04 metros
Peso de distancia de la celda α :	-c	0.85 metros
Multiplicador de la velocidad del nodo:	-m	0.01 m/s
Exponente de tiempo de espera:	-e	1.35 segundos
Límite superior de tiempo de espera	-u	500 segundos

Tabla 4.2: Valores de entrada para el modelo SWIM.

De la Tabla 4.2, el parámetro α fue considerado con un valor de 0.85. Este valor se escogió bajo experimentos realizados en [20]. Los límites mínimo y máximo para los tiempos de detención, con valores de 30 y 500 segundos correspondientemente, han sido escogidos bajo la distribución de Pareto [20]. Cada nodo tiene un tiempo de espera con un valor de 1.35, el cual se ha obtenido de estudios realizados en [132]. El resto de parámetros de entrada para el modelo SWIM se han obtenido de experimentos realizados en [133].

4.1.1.2. Escenario SMOOTH

El modelo de movilidad SMOOTH fue simulado usando parámetros específicos descritos en la Tabla 4.3. Este modelo de movilidad puede tomar valores basados en trazas de distintos entornos, tales como centros comerciales, plazas, parques, entre otros. La sintonización de los parámetros propuestos en la Tabla 4.3, se basan en un entorno descrito por el movimiento de nodos dentro de centros comerciales [21].

4.1.1.3. Escenario SLAW

Similar al modelo de movilidad SMOOTH, SLAW pretende realizar una simulación de movimiento de nodos dentro de centros comerciales. Los parámetros específicos, que se tomarán para lograr este cometido, se

Parámetro	Argumento	Valor
Rango del nodo:	-g	100 metros
Número de agrupaciones:	-h	20 unidades
Comportamiento asintótico de la distribución de viajes (alfa, fmin, fmax):	-k,-l-m	0.7 metros 1 metro 500 metros
Comportamiento asintótico de la distribución de tiempos de detención (alfa, fmin, fmax):	-o,-p-q	2 segundos 1 segundo 1000 segundos

Tabla 4.3: Valores de entrada para el modelo SMOOTH.

describen en la Tabla 4.4.

Parámetro	Argumento	Valor
Número de puntos de referencia:	-w	50 unidades
Tiempo mínimo de pausa:	-p	30 segundos
Tiempo máximo de pausa:	-P	500 segundos
Exponente de Levy	-b	1 unidades
Parámetro de Hust:	-h	0.75 unidades
Peso de la distancia:	-l	3 metros
Rango de agrupamiento:	-r	50 metros
Radio del grupo:	-Q	10 metros
Radio de los puntos de referencia:	-W	10 metros

Tabla 4.4: Valores de entrada para el modelo SLAW.

De los parámetros descritos en la Tabla 4.4, el parámetro *Hurst* fue obtenido mediante experimentaciones descritas en [134], mientras que el resto de parámetros se los ha sintonizado mediante estudios realizados en [22].

4.1.1.4. Escenario restricciones geográficas

Este modelo de movilidad difiere del resto de modelos en cuanto a generación de trazas. A diferencia del resto de modelos presentados, restricciones geográficas es un modelo que limita el movimiento de los nodos. Esto se debe a que este modelo realiza una simulación de movimiento de nodos, basado en el uso de mapas. Para extraer los mapas se utilizó el software [Open Street Maps \(OSM\)](#) [135]. La Figura 4.1 muestra un extracto de mapa obtenido de la ciudad de Cuenca, mediante el uso de [OSM](#). En concreto, trabajamos con la zona de "Arenal" porque es altamente concurrida por peatones debido a que es una zona comercial.

Una vez extraído el mapa, se procedió a simular movilidad sobre los nodos. La simulación de movimiento se la realizó mediante [SUMO](#), con los parámetros descritos en la Tabla 4.5.

Parámetro	Valor
Aparición de nodos por segundo:	0.1 nodos/segundo 0.2 nodos/segundo 0.3 nodos/segundo
Tiempo de simulación:	500 segundos
Distancia máxima recorrida:	800 metros

Tabla 4.5: Valores de entrada para el modelo Restricciones Geográficas [2].

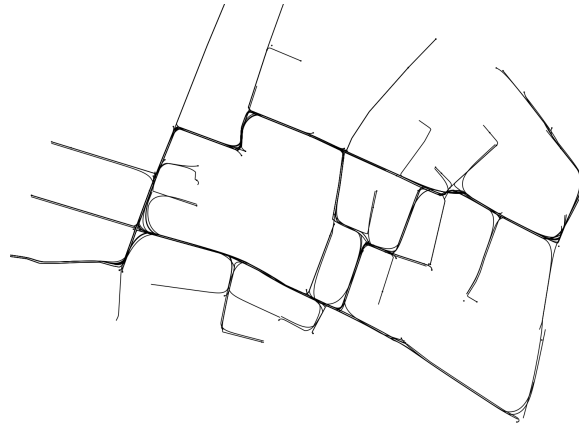


Figura 4.1: Extracto de mapa de la ciudad de Cuenca.

De la Tabla 4.5, el parámetro **Aparición de nodos por segundo** contiene tres valores. Estos tres valores corresponden a simulaciones con 50, 100 y 150 nodos respectivamente. Los valores asignados a cada parámetro se los ha considerado de estudios realizados en [2].

4.1.1.5. Escenario área de desastre

Este modelo está basado en un incidente producido en Alemania en el año 2005-2006 [61]. El modelo pretende recrear el escenario ocurrido en dicha catástrofe. Un ejemplo de traza generada por este modelo de movilidad se ilustra en la Figura 4.2, en la que se destacan 5 áreas de interés:

- Ubicación del incidente (IL).
- Pacientes en espera del área de tratamiento (PWT).
- Estación de compensación de víctimas (CCS).
- Comando técnico operacional (TOC).
- Punto de estacionamiento de ambulancias (APP).

La Figura 4.2 plantea un escenario típico usado en el modelo área de desastre [136]. Para establecer la movilidad dentro de las áreas definidas, es necesaria la inclusión de los parámetros descritos en la Tabla 4.6.

Parámetro	Argumento	Valor
Media de nodos por grupo:	-a	1 nodos/segundo
Probabilidad de cambio de grupo:	-c	0 % (unidades)
Áreas de catástrofe:	-e	8 unidades
Máxima distancia al centro del grupo:	-r	1 metro
Máxima velocidad:	-h	2 m/s
Mínima velocidad:	-l	1 m/s
Máximo Tiempo de detención:	-p	20 segundos

Tabla 4.6: Valores de entrada para el modelo RWP.

El parámetro **áreas de catástrofe**, dentro de la Tabla 4.6, indica el número de agrupaciones dentro del entorno de simulación. Cada una de estas agrupaciones debe definirse dentro del área de simulación. Para ello se han usado las coordenadas descritas en la Tabla 4.7. Los parámetros x y y indican las posiciones donde se generarán las agrupaciones. Los parámetros e_r y a_r indican los puntos de entrada y salida de los nodos.

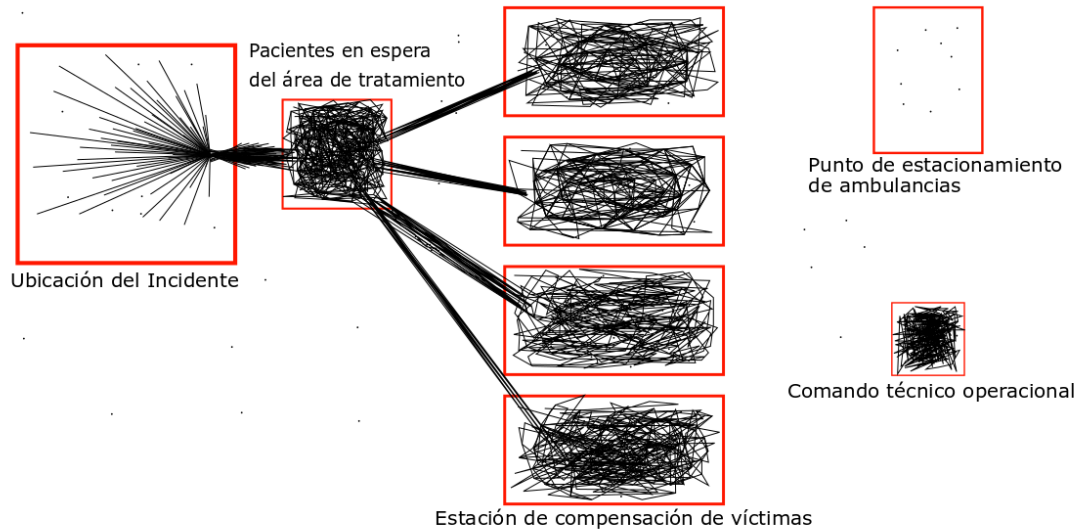


Figura 4.2: Traza modelo de movilidad Área de Desastre.

Además cada área tiene un número de nodos y un ciclo de movimiento específicos. Los valores asignados a cada parámetro, tanto de la Tabla 4.2, como la Tabla 4.7 se han obtenido de estudios realizados en [2, 136].

Parámetro	IL	PWT	CCS1	CCS2	CCS3	CCS4	TOC	APP	OBST
x_1	25	133	220	200	220	220	320	320	25
y_1	5	25	5	46	86	126	75	5	125
x_2	125	180	300	300	300	300	345	345	100
y_2	5	25	5	46	86	126	75	5	125
x_3	125	180	300	300	300	300	100	50	100
y_3	100	75	40	80	120	160	320	50	200
x_4	25	133	220	220	220	220	345	320	25
y_4	100	75	40	80	120	160	100	50	200
e_{rx}	25	133	220	220	220	220	330	5.345	-
e_{ry}	50	50	20	60	100	140	75	0.0	-
a_{rx}	125	180	310	310	310	310	330	325.325	-
a_{ry}	50	50	20	60	100	140	76	5.50	-
Número de nodos:	15	39	15	15	15	15	6	30	-
Ciclo de movimientos:	15	37	-	-	-	-	-	28	-

Tabla 4.7: Valores para la distribución de cada punto de referencia.

4.1.1.6. Escenario RWP

Finalmente, se definen los valores para los parámetros del modelo RWP en la Tabla 4.8. Este modelo permite definir un rango de valores, discreto y uniforme, respecto a las velocidades de los nodos [56]. Los tiempos de parada contienen un valor fijo, a diferencia de los otros modelos anteriores. Todos estos valores se han obtenido de estudios realizados en [2].

Todos los modelos de movilidad, descritos en los apartados previos, generan archivos con extensiones **txt**.

Parámetro	Argumento	Valor
Velocidad máxima:	-h	4 m/s
Velocidad mínimo:	-l	2 m/s
Tiempo de espera:	-p	20 segundos
Dimensiones	-o	3 unidades

Tabla 4.8: Valores de entrada para el modelo RWP.

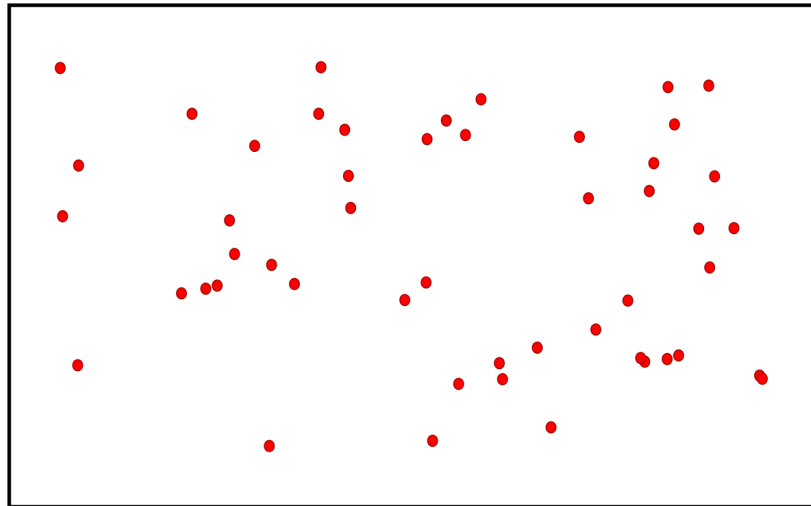


Figura 4.3: Trazas de movilidad creada a partir del modelo de movilidad SWIM, usando NetAnim para visualizar el movimiento de los nodos.

Dentro de cada archivo se encontrarán estructuras que contendrán los valores de las posiciones y velocidades de cada nodo, en tiempos específicos. Con el objetivo de verificar que estas estructuras generan trazas de movilidad correctamente, se ha usado el software [NetAnim \(NA\)](#). [NA](#) es un paquete incluido dentro del software [NS-3](#) [122] para la observación de trazas de movilidad. [NA](#) permite trazas de movilidad en formato **xml**, por lo que es necesario cambiar de formato. Para ello, se ha propuesto el Listado (4.2). El resultado de simular el movimiento en NetAnim puede ser observado en la Figura 4.3.

4.1.2. Obtención de la matriz de Adyacencia y matriz de Costes

La matriz de adyacencia, al igual que la matriz de costes, ofrecen información del estado de enlaces de la red. Esto resulta de mucha utilidad debido a que sería ineficiente obtener información de la topología de una red considerablemente grande solo gráficamente [83]. En la Sección 2.3.1 se ha descrito a la matriz de adyacencia como una matriz binaria. También se ha definido que la matriz de adyacencia es siempre una matriz cuadrada $n \times n$. Estas características también se aplican a las matrices de costes, con la diferencia que la última no contiene valores binarios. La matriz de costes utiliza valores en el rango $[150, \infty)$. Estos valores indican la calidad que tendrán los enlaces establecidos. Los enlaces que contenga valores cercanos a 150, serán enlaces de mejor calidad, respecto a aquellos que se alejen de este valor. La matriz de costes también indicará, con un valor de 0 la ausencia de enlaces entre pares de nodos.

Para obtener tanto, la matriz de adyacencia como la matriz de costes, es necesario la utilización de un entorno de simulación de redes. El entorno de simulación de redes utilizado es [NS-3](#). Este entorno de simulación está basado en eventos discretos, lo que indica que se tomaron marcas de tiempo específicas y distribuidas de manera

uniforme. Por ejemplo, considere la Figura 4.4 la cual pertenece al modelo de movilidad **SWIM**. Esta figura contiene el estado de la red transcurridos los 5 primeros segundos de simulación. Ahora, considere la Figura 4.5 la cual pertenece a la misma traza de movilidad **SWIM**, pero transcurridos 105 segundos de simulación. El escenario a los 5 segundos presenta diferencias respecto al escenario a los 105 segundos. Esta diferencia se debe a la distribución de los nodos sobre el área de simulación, diferencia provocada por el movimiento de los nodos.

NS-3 considera a la red, en cada marca de tiempo, como una red distinta, debido a la discretización [122]. Por tal motivo, se simuló cada segundo de movilidad de forma independiente, en estos, se establecieron enlaces entre los pares de nodos más cercanos entre sí de acuerdo al modelo de propagación. Para establecer los enlaces entre los nodos, se utilizaron paquetes *Hello*, cada uno con una longitud de 512 *bytes*. La transmisión de estos paquetes se envió usando el modelo **Free Space Propagation (FSP)** con un máximo de 3 retransmisiones. Por último, los 500 segundos de simulación, descritos por cada modelo de movilidad, se han tomado en saltos discretos de 5 segundos, siguiendo la metodología aplicada en [2]. Todo este proceso se ha llevado a cabo mediante el Listado (B.1). Este listado devuelve como resultado las matrices de adyacencia y costes cada 5 segundos de simulación. Estas matrices son alojadas en un archivo con formato **txt**.

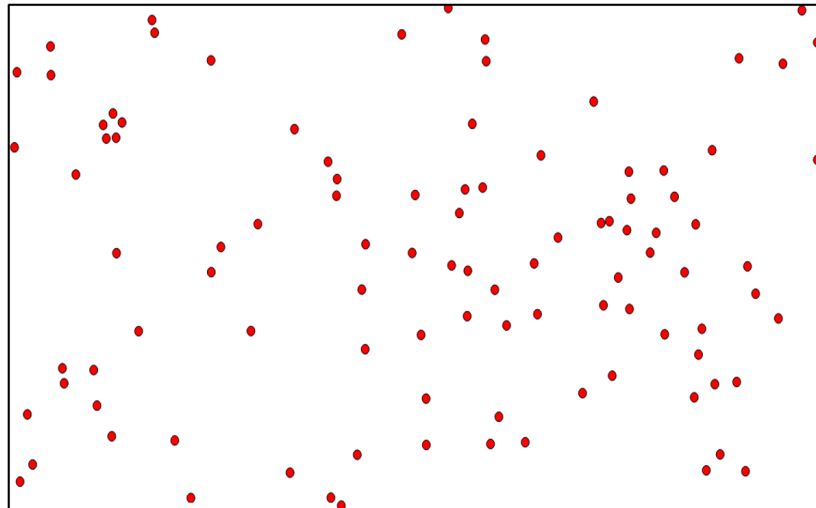


Figura 4.4: Escenario de simulación de movimiento transcurridos 5 segundos desde su inicio. El escenario contiene 100 nodos distribuidos en toda su área.

NS-3 no permite la inclusión de trazas de movilidad de forma directa. Para importar trazas de movilidad en **NS-3** se debe hacer uso de una librería compatible con **Network Simulator 2 (NS-2)** [137]. Las trazas de movilidad aceptadas por **NS-2** contienen una estructura similar al Listado (4.1). Siguiendo esta estructura, la importación de trazas de movilidad se las realizó mediante el Listado (4.2).

```
1 $NodeID set X_ <initial x position>
2 $NodeID set Y_ <initial y position>
3 $NodeID set Z_ <initial z position>
4 $ns_ at <time> "$NodeID setdest <x> <y> <speed>"
```

Listado 4.1: Estructura de movilidad aceptada por NS-2. Esta estructura de movilidad también es generada por las plataformas BM y SUMO

```
1 #include "ns3/core-module.h"
2 #include "ns3/mobility-module.h"
3 #include "ns3/ns2-mobility-helper.h"
```

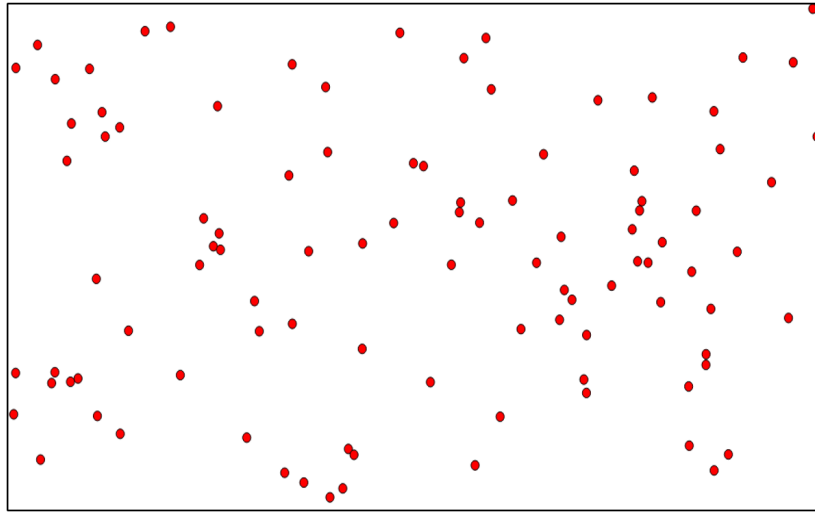


Figura 4.5: Escenario de simulación de movimiento transcurridos 105 segundos desde su inicio. Se observan los mismos 100 nodos de la Figura 4.4, pero distribuidos de diferente manera.

```
4 #include "ns3/netanim-module.h"using namespace ns3;
5 int main (int argc, char *argv[])
6 {
7 // Creación de Ns2MobilityHelper para importar la traza de movilidad en formato ns-2
8 Ns2MobilityHelper ns2 = Ns2MobilityHelper ("modelo_movilidad.txt");
9
10 // Creación de nodos
11 NodeContainer nodes;
12 nodes.Create (100); // Este número cambiará para crear 3 escenarios: 50, 100 y 150 nodos
13
14 // Configura el movimiento de cada nodo al leer el archivo de movilidad
15 ns2.Install ();
16
17 // Obtención de la traza para observarla desde NetAnim
18 AnimationInterface anim ("Traza_modelo.xml");
19 Simulator::Stop (Seconds (500));
20 Simulator::Run ();
21 return 0;
22 }
```

Listado 4.2: Librería NS-2 importada en NS-3. La importación de las trazas se las ha realizado para 100 nodos tal como se observa en la línea 12. El tiempo de simulación total está descrito en la línea 19 y corresponde a los 500 segundos establecidos en la Sección 4.1.1

Una vez obtenidas las matrices de adyacencia y de costes, se procedió a crear archivos *Pajek.net*. Estos archivos se ocupan en el software de análisis de grafos **Gephi** [138], y son necesarios para la obtención de métricas de teoría de grafos. Para crear estos archivos *Pajek.net* se utilizó el Listado (4.3), empleando el software Matlab [139]. En el apéndice B se describen las librerías ocupadas para el funcionamiento del Listado (4.3).

```
1 nodosNum=50; %numero de nodos 50, 100 y 150
2 modeloMovilidad='SWIM'; %modelos de movilidad SWIM, SMOOTH, SLAW, Restricciones Geograficas
   , Area de Desastre y RWP.
3 j=5; %marca el inicio de las simulaciones, las cuales se toman de 5 en 5 segundos
4 for i = 1:1:99 %recorre las 100 simulaciones generadas en NS-3
```

```
5 % Ingresa la matriz A
6 filename="C:\Users\Feshi\Desktop\Trace"+modeloMovilidad+"_"+nodosNum+"nodos"+"Amatrix\
  MatricesA\A_Matrix_"+i+".txt"
7 delimiterIn = ' ';
8 headerlinesIn = 0;
9 matrixA = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
10
11 Ingresa la matriz de posiciones
12 filename2="C:\Users\Feshi\Desktop\Trace"+modeloMovilidad+"_"+nodosNum+"nodos\posSec\Sec
  "+j+".txt";
13 delimiterIn = ' ';
14 headerlinesIn = 1; %Toma en cuenta un encabezado para separarlo de los datos
15 coords= importdata(filename2,delimiterIn,headerlinesIn); %importa la matriz de
  coordenadas
16 coord=[coords.data zeros(nodosNum,1)]; %Agrega una columna de zeros correspondiente al
  eje z
17
18 %Ingresa el directorio de salida para el archivo .net
19 outFolder = "C:\Users\Feshi\Desktop\forGephi"+modeloMovilidad+"_"+nodosNum+"nodos\Sec"+
  j+".net";
20
21 %Genera el archivo NET PAJEK
22 write_matrix_to_pajek(matrixA,outFolder,'weighted',false,'directed',false,'coords',
  coord);
23 j=j+5;
24 end
```

Listado 4.3: Algoritmo que describe los parámetros de entrada necesarios para obtener el archivo en formato Pajek.net. Este algoritmo cuenta con una variable de entrada para seleccionar el modelo de movilidad. También se cuenta con una variable para seleccionar la densidad de nodos de la red.

Por último, dentro de este apartado, las matrices de coste fueron transformadas en matrices de peso. Las matrices de peso consisten en valores inversos a los valores de las matrices de coste. De esta manera, mediante el uso de la plataforma **Python** [140], se desarrolló un algoritmo que permitió invertir cada valor de las matrices de coste. Este último paso fue considerado a conveniencia debido a que Gephi acepta, únicamente, matrices de peso.

4.1.3. Obtención de métricas de teoría de grafos

En este último apartado, se ha tomado en consideración la obtención de métricas de teoría de grafos. Para ello, como se mencionó con antelación, se ha utilizado el software Gephi. Dentro de este software se establecen distintos criterios para el análisis de grafos. Por ejemplo, dentro de la Figura 4.6 se han comparado los valores obtenidos en la métrica de grado, usando variaciones de color y tamaño en los nodos. Este criterio permitió verificar el estado de la red de forma gráfica. Además, dentro de la misma Figura 4.6, se aplicó el promedio de valores de métrica de todos los nodos. Este criterio basado en el promedio de valores, se obtuvo para realizar comparaciones entre los distintos modelos de movilidad. Estos criterios establecidos en la Figura 4.6 fueron aplicados a todos los modelos de movilidad, utilizando todas las métricas descritas en la Sección 2.3.

Dentro de esta metodología, se tomó en consideración un número máximo de 150 nodos en la red para el análisis de datos. Esto se debe a que simulaciones con un mayor número de nodos al establecido, generaban un excesivo número de nodos aislados en la red en todos los modelos de movilidad. Este excesivo número de nodos

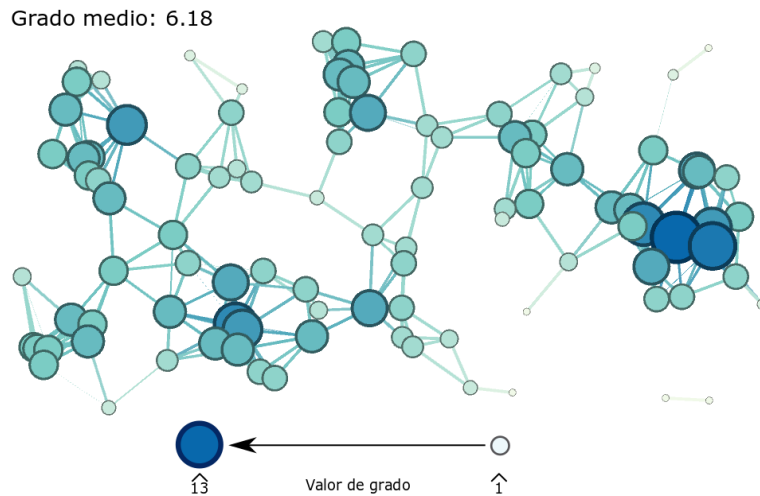


Figura 4.6: Red de ejemplo obtenida desde Gephi. Para simular esta red, se utilizó el modelo de movilidad SWIM. La métrica analizada corresponde a la centralidad de grado. El tamaño de los nodos indica el valor de centralidad que tiene cada nodo, el tamaño del nodo es proporcional al valor de centralidad de grado. De la misma manera, la variación de colores indica el valor de centralidad de grado. Colores más saturados reflejan mayor valor de centralidad de grado en un nodo.

aislados se producía por la saturación y colisión de paquetes *HELLO*, los cuales son necesarios para establecer enlaces entre los nodos. De esta manera, mediante análisis experimentales el número máximo de nodos dentro de la red, evitando un excesivo número de nodos aislados, fue de 150.

4.2. Evaluación del desempeño de la red

El principal objetivo, que se busca al evaluar el desempeño de la red, es el de estudiar el impacto de los distintos modelos de movilidad en las redes inalámbricas en malla. Usando los resultados obtenidos de las métricas de teoría de grafos en el apartado anterior, se plantea estudiar el comportamiento de la red cuando se introduce flujos de tráfico. Las pruebas realizadas consistieron en desprender paulatinamente distintos nodos de la red. Esto con el propósito de observar cómo afecta la tasa de entrega de paquetes cuando se han ido retirando nodos con alto valor en cada métrica.

Para la evaluación del desempeño de la red, se consultó la metodología aplicada en estudios realizados por [101, 112, 113]. Estos estudios se enfocan en el análisis de métricas evaluando el PDR (para verificar comportamiento del tráfico de datos sobre la red). Además, se utilizó la metodología aplicada por Barabási [32], el cual usa la métrica de grado para evaluar el estado de enlaces de una red. En base a las metodologías presentadas, se desarrolló un proceso que consta de los siguientes pasos:

- Obtención de trazas para pruebas de robustez.
- Configuración de nodos y generación de flujos de tráfico.
- Simulación de tráfico de datos en la red.

Sin embargo, no todas las métricas de teoría de grafos ofrecieron resultados satisfactorios mediante la metodología planteada. Por tal motivo, se adjunta una sección adicional a las tres descritas, donde se especificará una nueva metodología para las métricas que no cumplieron con su cometido. La sección donde se especifica la nueva metodología es la siguiente:

- Análisis de *clusters* de servidores sobre WMNs.

4.2.1. Obtención de trazas para pruebas de robustez

Para las pruebas de robustez de red, se ocuparon los modelos de movilidad que presentaron los valores más altos y más bajos en cada métrica de teoría de grafos. De esta manera se seleccionaron dos modelos de movilidad por métrica, los cuales se compararon bajo el concepto de integridad y robustez de red. Las pruebas de estos modelos se ejecutaron sobre redes con un valor de nodos fijo igual a 100.

Una vez identificados los modelos de movilidad a utilizar, se tomó el valor de métrica asignado a cada nodo en orden descendente. Posteriormente, se eliminó uno por uno los nodos con mayor valor en cada métrica. Cada vez que se elimina un nodo, se realiza un análisis de tráfico en la red. Este proceso se lo llevó a cabo hasta alcanzar un 10 % de nodos desprendidos del total de nodos existentes en la red. Este porcentaje se ha tomado de estudios propuestos en la Sección 3.

Al momento de realizar el proceso de segregación iterativa, se encontró que es necesario actualizar los identificadores de los nodos. Gephi, plataforma donde se realizó el análisis de modelos de movilidad y métricas, utiliza estos identificadores para obtener datos sobre cada uno de los nodos de la red. Al momento de desprender un nodo, este identificador desaparece y genera errores, por lo que se debe recorrer el resto de identificadores hasta cubrir el identificador ausente. El comando para la corrección de identificadores se describe en el Listado (4.4).

```
1 sed -i "s/node\_("$nodeOld")/"$nodeNew"/" tracefile.txt}
```

Listado 4.4: Comando en bash para sustituir identificadores en los nodos.

El Listado (B.5), descrito en el Apéndice B, muestra de forma detallada el proceso para la modificación de identificadores.

4.2.2. Configuración de los nodos y generación de flujos de tráfico

Una vez escogidos los modelos de movilidad sobre cada métrica, se procede a la configuración de los nodos. Esta configuración permite distinguir a los nodos entre cliente y servidor. Además, gracias a esta configuración, se habilita la posibilidad de enviar tráfico de datos sobre la red. Para configurar los nodos, se utilizó la plataforma NS-3. Sobre esta plataforma, y mediante el Listado (4.5), se sintonizaron los parámetros necesarios para que un nodo funcione como cliente o enrutador. Dentro de la asignación de roles en el Listado (4.5), se estableció que los datos de los clientes se transmitan utilizando User Datagram Protocol (UDP) como protocolo de transporte. Esto con el fin de simular tráfico de aplicaciones en tiempo real.

```
1 //Server Side
2
3 UdpServerHelper server_10_44 (4054);
4 ApplicationContainer Sapps_10_44 = server_10_44.Install (nodes.Get(44));
5 Sapps_10_44.Start (Seconds (40.0));
6 Sapps_10_44.Stop (Seconds (m_totalTime-5));
7
8 //Client Side
9
10 UdpClientHelper udpClient_10_44 (interfaces.GetAddress (44), 4054);
11 udpClient_10_44.SetAttribute ("MaxPackets", UIntegerValue (m_maxPacketCount));
12 udpClient_10_44.SetAttribute ("Interval", TimeValue (Seconds (m_packetInterval)));
13 udpClient_10_44.SetAttribute ("PacketSize", UIntegerValue (m_packetSize));
14 ApplicationContainer Capps_10_44 = udpClient_10_44.Install (nodes.Get(10));
15 Capps_10_44.Start (Seconds (50.0));
16 Capps_10_44.Stop (Seconds (m_totalTime-5));
```

Listado 4.5: Configuración enrutador y cliente con flujos UDP. Este listado se creó sobre la plataforma de simulación NS-3

Gracias a los identificadores de nodos, en el Listado (4.5) no es necesario generar direcciones específicas para cada nodo, sino que cada nodo adquiere una dirección basada en su identificador de nodo. De esta manera, los enrutadores sabrán a donde dirigir la información a través de la red.

El protocolo de enrutamiento utilizado en este trabajo es el Hybrid Wireless Mesh Protocols (HWMPs) porque usamos el estándar IEEE 802.11s, y que además es un enrutamiento en capa 2 o capa de enlace de datos.

Bajo el contexto estudiado, se utilizaron un máximo de 40 flujos de red. Esto indica que 40 flujos de datos serán enviados de forma simultánea sobre la red, simulando una transmisión de datos reales. Los 40 flujos se tomaron en consideración del estudio realizado en [2]. En dicho estudio, el valor máximo de flujos simultáneos alcanzó la cifra de 40, siendo el valor más alto sin que exista una saturación total de la WMN.

4.2.3. Simulación de tráfico de datos en la red

Una vez establecidos los parámetros de configuración para los nodos, así como la cantidad máxima de flujos simultáneos, se procede a definir qué nodos actúan como cliente y cuáles como servidores, en función de los resultados de métricas de grafos obtenidos en 4.1. En cuanto a los enrutadores, todos los nodos se los define como enrutadores a través de la variable **Routers** en el Listado (B.4), ya que se analizará la red en modo reactivo por tratarse de WMNs.

Después de establecer las configuraciones para cliente y servidor, así como de definir el número máximo de flujos de información simultáneos, se procede a la simulación de las redes mediante NS-3. Para lograr este cometido, se usó el ejemplo que proporciona [122, 141]. En la versión 3.28 de NS-3 se puede encontrar el listado con el nombre "mesh.cc". El Listado (B.4), descrito en el Anexo B, muestra las respectivas modificaciones y ajustes realizados de acuerdo a las necesidades y requerimientos del presente trabajo.

Una de las variables de interés, descrita en el Listado (B.4), es la denominada **Routers**. Esta variable consta de un vector con valores binarios. El valor 1 indica que a un nodo le ha sido asignado el rol de enrutador, mientras que el valor 0 indica que a un nodo se le ha sido asignado el rol de cliente únicamente. Esta variable **Routers** tiene la misma longitud que el número de nodos dentro de la red. Las posiciones de cada valor indican, mediante los identificadores, a qué nodo le corresponde la función de enrutador.

El tiempo total de simulación se ha establecido en 350 segundos para aumentar la fiabilidad en los datos resultantes. El tiempo de simulación establecido fue tomado en consideración del estudio realizado en [142]. Dentro de este estudio, simulaciones con 240 segundos de duración entregaban resultados confiables.

El proceso de simulación de tráfico es iterativo, por lo que se puede repetir esta simulación tantas veces como se desee. En este caso, se ha repetido cada simulación 100 veces, con el objetivo de crear intervalos de confianza que alcancen el 99 % de fiabilidad. Para lograr dicho cometido, se ha generado un listado en bash mediante el comando **SED**. Además, los diversos cálculos estadísticos se han realizado mediante el comando **calc**. Dicho proceso se ha descrito mediante el Listado B.6, el cual se encuentra en el Apéndice B. Al final de cada simulación se generan archivos .xml, los cuales consisten en reportes de cada uno de los nodos. Estos reportes se analizarán para obtener el **PDR** promedio de la red.

4.2.4. Análisis de clusters de servidores en las redes inalámbricas en malla

Tal como se mencionó al principio de este apartado, no todas las métricas establecidas para este estudio generaron resultados satisfactorios. Dichas métricas corresponden al vector propio, excentricidad y coeficiente de agrupamiento. Los resultados de estas métricas se adjuntan en las Figuras A.3, A.4 y A.5 ubicadas en el Apéndice A. Por tal motivo, la metodología aplicada hasta el momento ha sido descartada para estas tres métricas.

Debido a que el propósito de este trabajo es el de analizar el impacto de los distintos modelos de movilidad, y sus respectivas métricas de teoría de grafos resultantes, sobre WMNs, para este caso se propuso una metodología diferente. Esta metodología se basa en la combinación de las métricas de vector propio, excentricidad y coeficiente de agrupamiento con la métrica de modularidad. Gracias a esta última métrica, se pueden crear comunidades dentro de la red. Sobre cada comunidad se escogieron los nodos con un alto valor en las tres métricas antes mencionadas. Los nodos con mayor valor de estas métricas, se configuraron como servidores, mientras que los nodos adyacentes (correspondientes a la misma comunidad) se configuraron como clientes. El objetivo de crear servidores y clientes fue evaluar los retardos de la información distribuida sobre cada comunidad, así como el **PDR** al transmitir flujos de información simultáneos. La configuración de servidores y clientes es similar al descrito en el Listado (4.5).

Para medir el retardo existente entre cada par servidor-cliente, se propone el uso de la herramienta de monitoreo **Flow Monitor**, disponible en la plataforma NS-3. En el Listado (4.6) se encuentra descrito la configuración del *Flow Monitor*.

```
1 // Incluir la librería al inicio del script
2 #include
```

```
4 "ns3/flow-monitor-helper.h"
5
6
7 // Flow monitor
8 Ptr<FlowMonitor> flowMonitor;
9 FlowMonitorHelper flowHelper;
10 flowMonitor = flowHelper.InstallAll();
11
12 Simulator::Stop
13 (Seconds(stop_time));
14 Simulator::Run
15 ();
16
17 // Salida de la información de Flow Monitor en formato xml
18 flowMonitor->SerializeToFile("output.xml", false, false);
```

Listado 4.6: listado base para el uso de Flow Monitor

Dentro del Listado (4.6), el comando `SerializeToFile` tiene tres funciones: en la primera se coloca el nombre de salida del archivo .xml, donde se guardarán los datos resultantes del módulo *Flow Monitor*. Los resultados obtenidos de la primera función se listan a continuación:

- **flowId**= Corresponde al identificador del flujo que se está analizando, el mismo que por defecto corresponde a un valor entero que empieza en 1 y aumenta progresivamente de uno en uno.
- **timeFirstTxPacket**= información de cuándo se transmitió el primer paquete del flujo en nanosegundos.
- **timeLastTxPacket**= información de cuándo se transmitió el último paquete del flujo expresado en nanosegundos.
- **timeFirstRxPacket**= información expresada en nanosegundos del instante en el que el primer paquete del flujo fue recibido por un nodo final.
- **timeLastRxPacket**= información expresada en nanosegundos del instante en el que se recibió el último paquete del flujo.
- **delaySum**= información expresada en nanosegundos de la suma de todos los retrasos de extremo a extremo para todos los paquetes recibidos del flujo.
- **jitterSum**= información expresada en nanosegundos de la suma de todos los valores de variación de retardo de extremo a extremo (jitter) para todos los paquetes recibidos del flujo, como se define en RFC 3393.
- **txBytes**= información del número total de bytes transmitidos para el flujo.
- **txPackets**= información del número total de paquetes transmitidos para el flujo.
- **rxBytes**= información correspondiente al número total de bytes recibidos para el flujo.
- **rxPackets**= información correspondiente al número total de paquetes recibidos para el flujo.
- **lostPackets**= información correspondiente al número total de paquetes que se asume que se perdieron (más precisamente, son los paquetes que no se informan después de 10 segundos)
- **timesForwarded**= indica la cantidad de veces que se ha enviado un paquete.
- **packetsDropped**= información correspondiente al número de paquetes perdidos.
- **bytesDropped**= información correspondiente al número de bytes perdidos.

La segunda y tercera función, del comando `SerializeToFile`, sirven para activar o desactivar el histograma y la información de los detalles de cada sonda en el flujo analizado. Aunque esta información resulta muy útil para el análisis de redes, en este estudio solo se ocupó "la información de las estadísticas del flujo",

donde el retardo de los paquetes se representa por el parámetro *DelaySum*. El uso de *Flow Monitor* se ejemplifica mediante el Listado (4.7).

```
1 <?xml version="1.0" ?>
2 <FlowMonitor>
3   <FlowStats>
4     <Flow flowId="1" timeFirstTxPacket="+0.0ns" timeFirstRxPacket="+22685491.0ns"
5       timeLastTxPacket="+12564489.0ns" timeLastRxPacket="+15063909.0ns" delaySum="+87526101.0
        ns" jitterSum="+1009261.0ns" lastDelay="+18069762.0ns" txBytes="394240" rxBytes="394240
        " txPackets="770" rxPackets="770" lostPackets="0" timesForwarded="7">
6   </Flow>
7 </FlowStats>
```

Listado 4.7: Ejemplo de la información de salida de los reportes de Flow Monitor en formato xml

El análisis de retardo fue aplicado sobre las métricas de vector propio y excentricidad. En cambio, el análisis de **PDR** se aplicó sobre la métrica de coeficiente de agrupamiento. A esta última métrica se la analizó con **PDR** debido a que se trata de una métrica que da mayor relevancia a los nodos que se encuentran mejor agrupados [26].

NOTA: En esta sección se obtuvieron datos en torno a modelos de movilidad que no involucren el modelo área de desastre. La razón de despreciar este modelo se debe a que el mismo presenta características topológicas con muchos nodos aislados. Esta característica impide el correcto funcionamiento de la red en términos de tráfico de información. Por tal motivo, el modelo área de desastre no ha sido tomado en consideración.

Resultados

En este capítulo se analiza el impacto de los distintos modelos de movilidad realistas disponibles en la literatura, cuando éstos se aplican a las redes inalámbricas de malla. El capítulo se ha estructurado en dos partes generales. En la primera se evalúan las características topológicas más relevantes de varios modelos de movilidad, y su impacto en las WMNs, empleando métricas de teoría de grafos. En la segunda parte se analiza el desempeño de red empleando los conceptos de integridad y robustez. Para este análisis se estudió el desempeño de la red cuando circula tráfico a través de ella, evaluando principalmente la tasa de entrega de paquetes.

5.1. Análisis del impacto de los modelos de movilidad empleando métricas de teoría de grafos

En esta sección se analiza el comportamiento de la red WMN aplicando diversas métricas de teoría de grafos, en presencia de diferentes modelos de movilidad. Los modelos de movilidad utilizados corresponden a SWIM, SMOOTH, SLAW, área de desastre, restricciones geográficas y RWP (Sección 2.2). Se utilizaron dos tipos de métricas de teoría de grafos: locales y globales. Las métricas locales se centran en características individuales de los nodos, mientras que las métricas globales toman en consideración el comportamiento conjunto de los mismos. Entre las métricas locales utilizadas se encuentran: centralidad de grado, centralidad de intermediación, centralidad de cercanía, centralidad de vector propio, excentricidad y coeficiente de agrupamiento (Sección 2.3). En cambio, para las métricas globales se consideró, únicamente, la métrica de modularidad. En las secciones que se presentan posteriormente, se analizará el comportamiento de la red usando una métrica específica, sobre cada uno de los modelos de movilidad propuestos.

5.1.1. Análisis de modelos de movilidad basados en la métrica de grado

En esta sección se analiza el comportamiento de la red usando la métrica de grado en función de cada uno de los modelos de movilidad. En la Figura 5.1, se observa un gráfico de barras, en el que cada modelo de movilidad se encuentra ubicado en el eje de las abscisas; mientras que el grado promedio está descrito en el eje de las ordenadas. El grado promedio indica el número de enlaces promedio en la red, tal como se describió en la Sección 2.3.1. La métrica de grado se interpreta en valores enteros. Si el resultado decimal, del valor promedio

de grado, supera el valor 0.5, el valor promedio sube al inmediato superior, caso contrario, solo se toma la parte entera del valor promedio. Además, la Figura 5.1 muestra los valores promedio de grado para simulaciones con 50, 100 y 150 nodos. Se incluyen también los intervalos de confianza en cada caso con el fin de ilustrar la fiabilidad de las simulaciones.

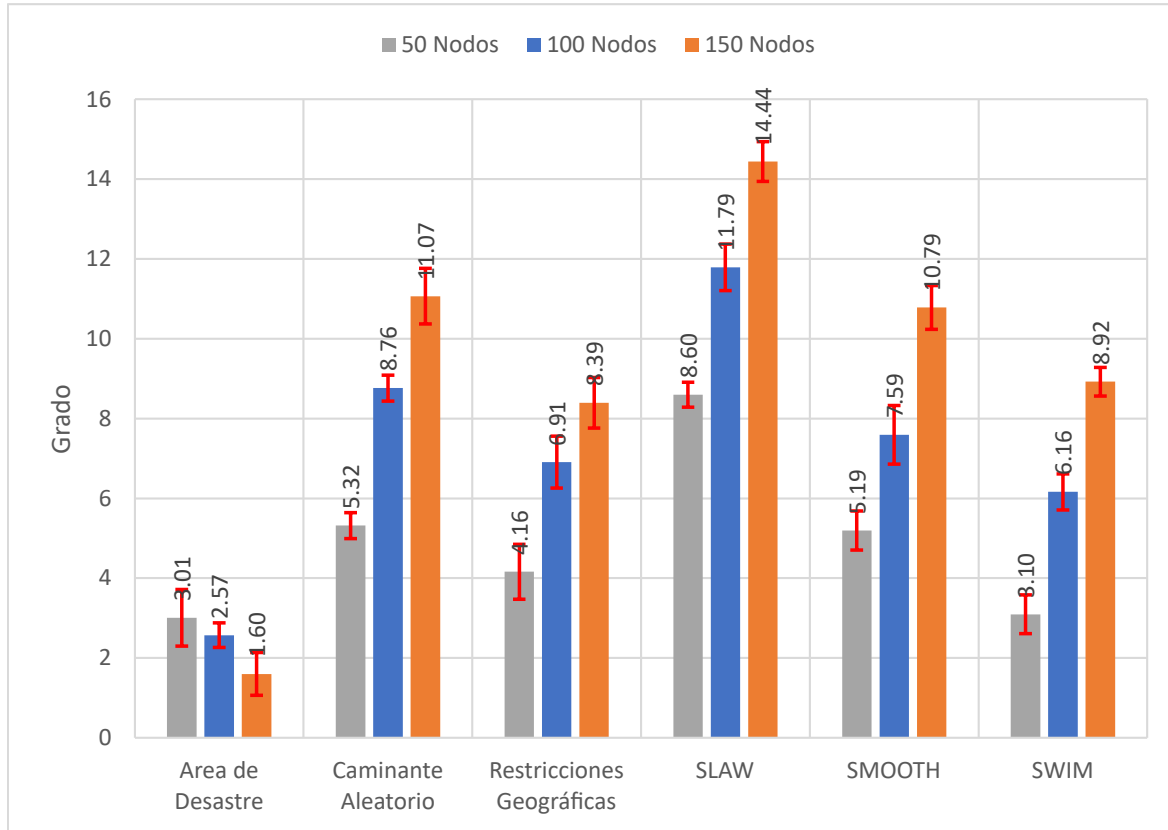


Figura 5.1: Resultados promedio de cada modelo de movilidad obtenidos mediante la métrica de grado. Estos resultados se obtuvieron de simulaciones con 50, 100 y 150 nodos. La escala de valores incluidos en el eje de las ordenadas indican el valor de métrica de grado, el cual se ha descrito en la Sección 2.3.1.

Al comparar los resultados presentados en la Figura 5.1, se observa que el modelo de movilidad **SLAW** presenta el valor promedio de grado más alto, alcanzando valores de 8, 11 y 14 enlaces en las simulaciones con 50, 100 y 150 nodos respectivamente. Por otro lado, sin considerar el modelo de movilidad área de desastre, **SWIM** presenta los valores promedio más bajos en simulaciones con 50 y 100 nodos, alcanzado valores de 3 y 6 enlaces respectivamente. Al tratarse de simulaciones con 150 nodos, restricciones geográficas es el modelo que posee menor valor promedio en la métrica de grado, alcanzando un valor de 8 enlaces. Como era de esperarse, para todos los modelos de movilidad, excepto el modelo área de desastre, se nota un incremento en el valor promedio de métrica de grado, conforme aumenta la cantidad de nodos en la red.

Debido al comportamiento distinto del modelo área de desastre, respecto al resto de modelos de movilidad, se consideró a este modelo en un análisis independiente. Tomando en consideración la Figura 5.1, el modelo área de desastre contiene valores promedio que van en decadencia. Estos valores corresponden a 3, 3 y 2 enlaces en las simulaciones con 50, 100 y 150 nodos. Esto indica que dentro de la red, la probabilidad de generar enlaces decrece conforme aumenta el número de nodos. Ese comportamiento se debe a que el modelo área de desastre genera un alto porcentaje de nodos aislados, lo cual, al aumentar el número de nodos en la red, disminuye la

probabilidad de generar enlaces entre nodos vecinos. En contraste con el resto de modelos de movilidad, este comportamiento es único para el modelo área de desastre.

Continuando con el análisis de modelos de movilidad, haciendo uso de la métrica de grado, se presenta la Figura 5.2. Esta figura muestra la distribución de probabilidad de la centralidad de grado descrita por el modelo de movilidad **SWIM**, simulado con 50, 100 y 150 nodos en la red. En el eje de las abscisas se describe el número de enlaces. En cambio, en el eje de las ordenadas se describe el porcentaje de nodos que alcanzan un determinado número de enlaces en la red. Al tomar en consideración las simulaciones con 50 nodos, el modelo **SWIM** alcanza un valor máximo de 8 enlaces en la red, la concentración máxima de nodos se encuentra alrededor de los 3 enlaces y, el porcentaje de nodos sin conexiones, o nodos aislados, es del 3.97 %. Al tomar en consideración las simulaciones con 100 nodos, **SWIM** alcanza un valor máximo de 15 enlaces en la red, la concentración máxima de nodos se encuentra alrededor de los 6 enlaces y el porcentaje de nodos aislados es del 0.67 %. Por último, al tomar en consideración las simulaciones con 150 nodos, **SWIM** alcanza un valor máximo de 20 enlaces en la red, la concentración máxima de nodos se encuentra alrededor de los 7 enlaces y el porcentaje de nodos aislados es del 0.16 %. Tal como se puede observar en la Figura 5.2, conforme incrementa el número de nodos en la red, el modelo **SWIM** tiende a expandir su distribución de probabilidad en el eje de las abscisas, lo cual indica que los nodos forman más enlaces entre sí. Además, para cumplir con la teoría fundamental de las probabilidades [143], las distribuciones de probabilidad tienden a generar menor concentración de nodos con enlaces específicos. De esta manera, conforme aumenta el número de nodos en la red, las probabilidades de concentración en enlaces específicos disminuyen. Por último, al aumentar el número de nodos, el porcentaje de nodos aislados tiende a disminuir. Esto se debe a que el área de simulación permanece constante al incrementar el número de nodos, por ende la probabilidad de generar enlaces entre nodos incrementa.

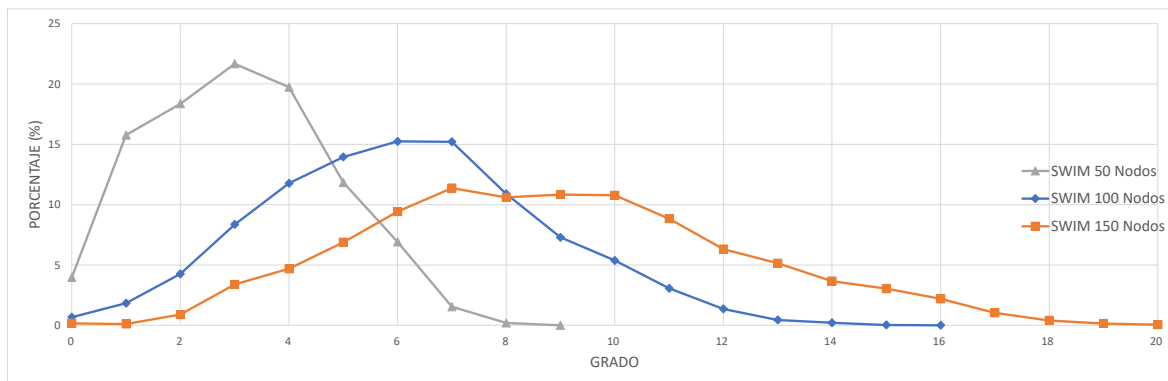


Figura 5.2: Métrica de centralidad de grado en el modelo de movilidad **SWIM** con a) 50, b) 100 y c) 150 nodos.

Tal como se mencionó con antelación, la Figura 5.2 presenta las distribuciones de probabilidad de la centralidad de grado para el modelo **SWIM**, bajo una distinta densidad de nodos. Esta figura sirve de ejemplo para establecer diferencias visuales entre las distribuciones de probabilidad para las tres distintas densidades de nodos. Un comportamiento similar ocurre con todos los modelos de movilidad, excepto con el modelo área de desastre. Mediante la Figura 5.3, se puede observar una comparación de la distribución de probabilidad de la centralidad de grado para todos los modelos en cuestión. Esta última figura se dividió en tres secciones, las cuales se representaron por las letras a), b) y c). Cada sección muestra las distribuciones de probabilidad de la centralidad de grado, de todos los modelos de movilidad, con simulaciones a 50, 100 y 150 nodos respectivamente. La estructura de la Figura 5.3 es similar al de la Figura 5.2, puesto que en la primera también se considera el número de nodos en el eje de las abscisas, mientras que en el eje de las ordenadas se muestra el

porcentaje de concentración de nodos. Tanto en las Figuras 5.2 y 5.3, las distribuciones de probabilidad de la centralidad de grado generadas por cada modelo de movilidad, excepto en el modelo área de desastre, describen un comportamiento expansivo en el eje de las abscisas, conforme aumenta el número de nodos en la red.

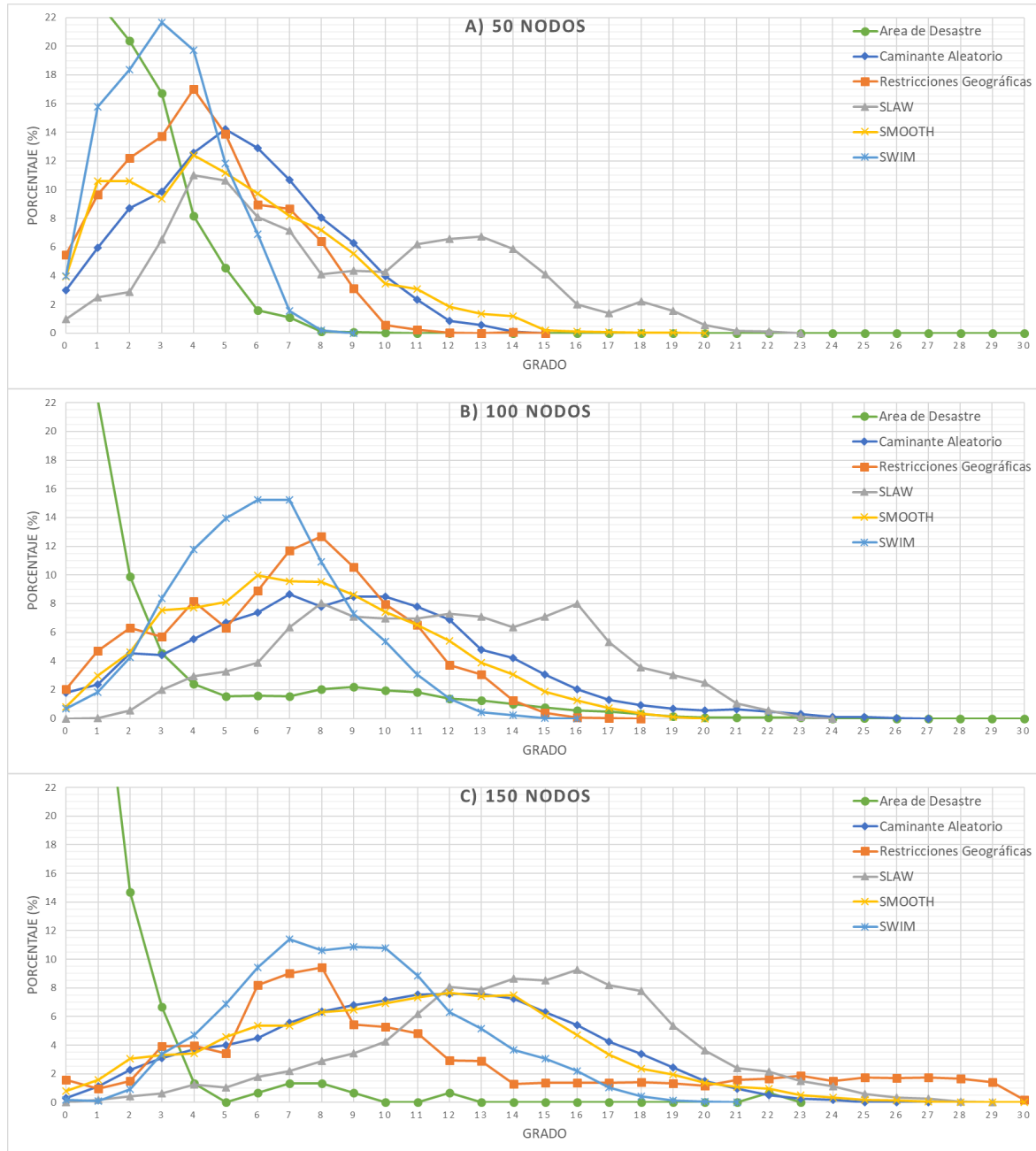


Figura 5.3: Funciones de Distribución de Probabilidad de la métrica de Grado con: A) 50, B) 100 y C) 150 Nodos.

Al analizar la Figura 5.3 se observa que a los 50 nodos en la red, la distribución de probabilidad de la centralidad de grado de **SLAW** se expande más que el resto de modelos, alcanzando un valor máximo de 23 enlaces; mientras que la distribución de probabilidad de **SWIM** es la que menos se expande en el eje de las abscisas, alcanzando un valor máximo de 8 enlaces. Considerando una densidad de 100 nodos en la red, la

distribución de probabilidad de **RWP** se expande más que el resto de modelos, alcanzando un valor máximo de 26 enlaces; mientras que la distribución de probabilidad de **SWIM** continúa siendo la de menor expansión, alcanzando un valor máximo de 15 enlaces. Por último, considerando simulaciones con 150 nodos en la red, la distribución de probabilidad de restricciones geográficas se expande más que el resto de modelos, alcanzando un valor máximo de 30 enlaces; mientras que la distribución de probabilidad de **SWIM** mantiene el menor dominio de expansión en el eje de las abscisas, alcanzando un valor máximo de 20 enlaces. Considerando estos valores de distribución de probabilidad de la centralidad de grado, y los descritos para el resto de modelos de movilidad de la Figura 5.3, se nota que, como era de esperarse, a medida que el número de nodos incrementa en la red, los modelos de movilidad incorporan un mayor número de enlaces en la red. Esta asunción ocurre para todos los modelos de movilidad, excepto área de desastre. No existe una tendencia fija para identificar el modelo que tendrá el mayor número de enlaces en la red; pero, por el contrario, el modelo **SWIM** siempre tenderá a formar el menor número de enlaces, respecto al resto de modelos de movilidad, sin considerar al modelo área de desastre. De esta forma, **SWIM** se describe como el modelo que tiende a generar una menor cantidad de enlaces en la red. Lo que implica que los nodos en la WMN están más alejados entre sí y presentan una distribución más uniforme cuando se aplica este modelo de movilidad.

Dentro de la Figura 5.3, también se tomó en consideración el porcentaje de nodos aislados en la red. Conforme aumenta el número de nodos dentro de la misma, los nodos aislados tienden a disminuir en porcentaje. Esto se debe a que el área de simulación es fija, dando como resultado un incremento en las probabilidades de formar enlaces entre los nodos. De este modo, los porcentajes de nodos aislados en todos los modelos de movilidad, excepto en el modelo área de desastre, no superan el 6 % en simulaciones con 50 nodos, el 3 % en simulaciones con 100 nodos y el 2 % en simulaciones con 150 nodos. El modelo área de desastre difiere en comportamiento respecto al resto de modelos de movilidad, debido a que sus porcentajes de nodos aislados van en incremento conforme aumenta el número de nodos en la red. Es por tal razón que en la Figura 5.3, área de desastre muestra un comportamiento completamente distinto al resto de modelos de movilidad.

Tomando en consideración los análisis anteriores, se puede llegar a las siguientes conclusiones en base a la métrica de centralidad de grado.

Restricciones geográficas, en comparación con el resto de modelos de movilidad, tiende a generar un mayor número de enlaces en la red, conforme aumenta el número de nodos. Área de desastre tiene un comportamiento distinto respecto al resto de modelos de movilidad, el cual contiene valores de grado promedio que van en decadencia. Además, la distribución de valor de grado tiende a centrarse en valores cercanos a cero, indicando que existen un porcentaje grande de nodos aislados en la red. **SWIM** tiende a mantener un valor de probabilidad máximo, en el eje de las ordenadas, mayor respecto al resto de modelos de movilidad, dentro de todas las simulaciones presentadas en la Figura 5.3. Esto indica que es el modelo que menos se expande en el eje de las abscisas, adquiriendo la menor cantidad de enlaces respecto al resto de modelos de movilidad. A pesar que **SLAW** es el modelo que tiende a generar mayor valor promedio respecto al resto de modelos de movilidad, su distribución de probabilidad alcanza hasta un máximo de 28 enlaces; en cambio, restricciones geográficas alcanza un valor de 30 enlaces como máximo. Sin embargo, debido a que la distribución de probabilidad de **SLAW** se centra en valores mayores que la distribución de probabilidad de restricciones geográficas, el resultado promedio de **SLAW** resulta ser mayor. Conforme aumenta el número de nodos, la probabilidad de que los nodos generen enlaces con valor 0 disminuye. Esto sucede para todos los modelos de movilidad, excepto área de desastre. En simulaciones con 50 nodos, todos los modelos, excepto área de desastre, tienden a centrar la mayor parte de su distribución de probabilidad en valores entre los 0 y 9 enlaces. Conforme aumenta el número de nodos, la concentración de probabilidad de la centralidad de grado tiende a diferir, en mayor medida, entre

todos los modelos de movilidad. El modelo **SLAW** posee una distribución de probabilidad de la centralidad de grado no convexa en simulaciones con 50 y 100 nodos. Este comportamiento también se observa para el modelo restricciones geográficas en simulaciones con 100 y 150 nodos. El modelo **SWIM**, posee una distribución de probabilidad convexa en todas las simulaciones. Esta distribución es la que más se distingue del resto, debido a que es la que menos se expande en el eje de las abscisas. Los modelos **SMOOTH** y **RWP** marcan una tendencia expansiva en el eje de las abscisas, similar a los modelos antes mencionados. Por último, el modelo área de desastre tiene una distribución de probabilidad muy distinta al comportamiento expansivo del resto de modelos. Este modelo tiene la particularidad de comprimirse en el eje de las abscisas, lo cual indica que a mayor número de nodos incorporados en la red, mayor es el número de nodos aislados en la misma. Estos comportamientos dan una idea de cuán uniforme es la distribución de enlaces en la red, teniendo cada modelo de movilidad cierta afinidad por valores de enlaces específicos.

5.1.2. Análisis basado en la métrica de Centralidad de Intermediación

En esta sección se consideró el uso de la distribución de probabilidad acumulada [143] de la métrica de intermediación para el análisis de los modelos de movilidad. Esto se realizó con el objetivo de verificar la presencia de la métrica de intermediación en la red, tomando como ejemplo las gráficas presentadas en [1]. Bajo esta consideración, se obtuvieron las Figuras 5.4, 5.5 y 5.6. Cada una de estas figuras se graficaron en escala logarítmica, con el objetivo de distinguir los valores entre cada modelo de movilidad debido a que, a escala lineal, estos valores se encontraban muy próximos entre sí. Estas figuras describen el valor de métrica de intermediación, otorgado por cada nodo dentro de la red, en el eje de las abscisas. Por otro lado, en el eje de las ordenadas se describe el porcentaje de los nodos en forma normalizada. Estas tres figuras muestran el comportamiento de los modelos de movilidad al simular densidades de 50, 100 y 150 nodos en la red. Además de las figuras descritas, se adjuntó para el análisis la Figura 5.7, en la que se describe el valor promedio de métrica de intermediación para cada modelo de movilidad, realizado sobre simulaciones con 50, 100 y 150 nodos en la red.

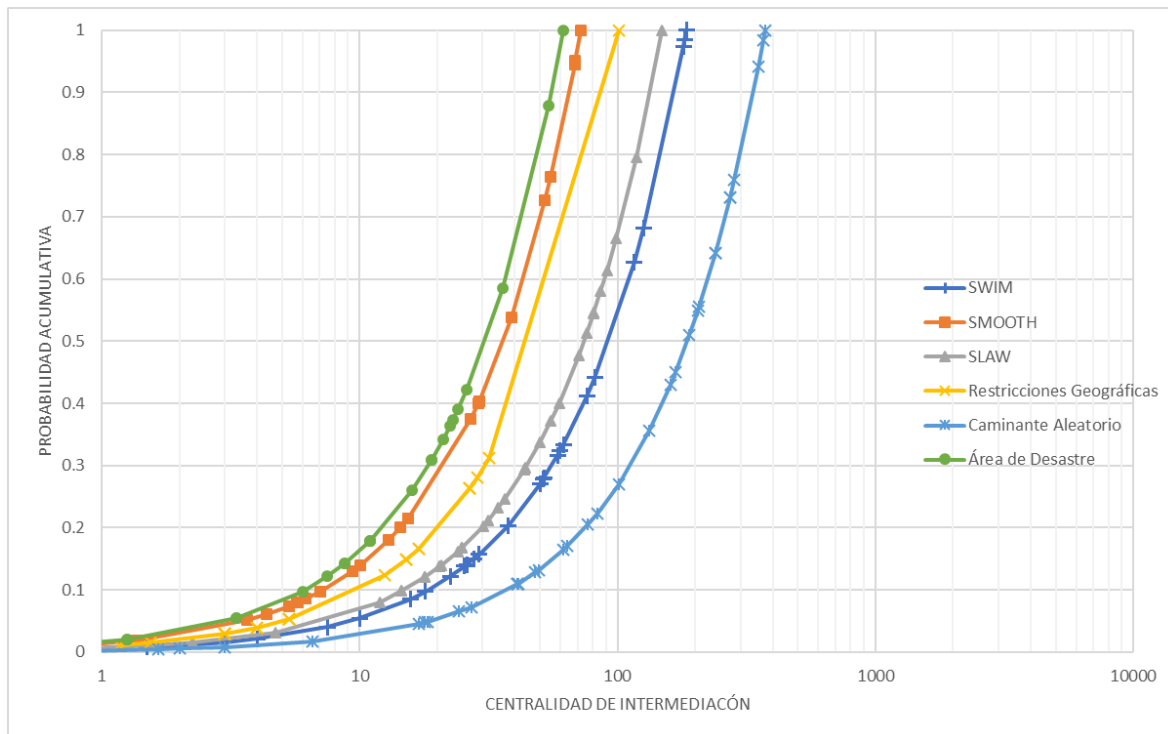


Figura 5.4: Resultados de los distintos modelos de movilidad, comparados mediante la métrica de intermediación. Para esta comparación se simuló 50 nodos dentro del área de simulación.

Comenzando por la Figura 5.4, se muestran las distribuciones de probabilidad acumulada sobre los distintos modelos de movilidad simulados con una densidad de 50 nodos en la red. Al observar esta figura se nota que el modelo **RWP** posee una distribución que tiende a generar mayores valores de intermediación en la red. En orden descendente se encuentran las distribuciones de probabilidad para los modelos **SWIM**, **SLAW**, restricciones geográficas, **SMOOTH** y **área de desastre**, siendo esta última la que posee una distribución con tendencia a los valores más bajos de intermediación, respecto al resto de modelos de movilidad. Todas estas distribuciones generan valores de intermediación entre 0 y 1000 en su dominio, donde las distribuciones de los modelos **RWP**, **SWIM** y **SLAW** tienden a formar valores de intermediación entre 100 y 1000; mientras que las distribuciones de los modelos restricciones geográficas, **SMOOTH** y **área de desastre** tienden a formar valores de intermediación entre 10 y 100.

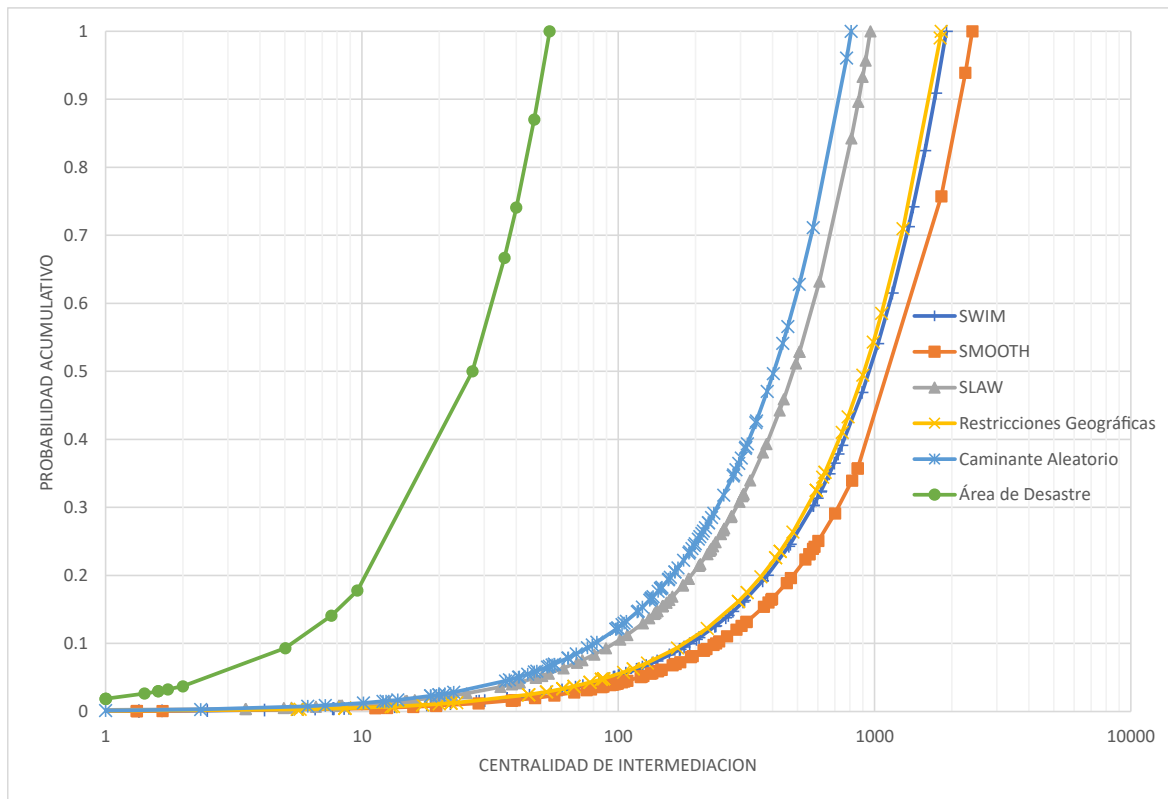


Figura 5.5: Resultados de los distintos modelos de movilidad, comparados mediante la métrica de de intermediación. Para esta comparación se estableció 100 nodos dentro del área de simulación.

Las distribuciones de probabilidad acumulada, descritas en la Figura 5.4, muestran el comportamiento de crecimiento en cada modelo de movilidad. Cada valor de intermediación, aportado por los nodos dentro de la red, representa un punto importante para el crecimiento de las distribuciones en cada modelo de movilidad. Sin embargo, debido a que la metodología descrita en la Sección 4.1 considera el promedio del valor de intermediación de varias simulaciones, no se logró extraer los resultados de intermediación entregados por cada nodo. A pesar de ello, se obtuvo el porcentaje de nodos que se encontraban en ciertos dominios de valores de intermediación. Estos dominios se describen mediante la Tabla 5.1. En base a esta tabla, se observa que el modelo SLAW posee el menor porcentaje de nodos con valor de intermediación igual a cero. Tomando en consideración un orden ascendente, los modelos RWP, SMOOTH, SWIM, área de desastre y restricciones geográficas, poseen un porcentaje mayor de nodos con métrica de intermediación igual a cero, siendo el modelo restricciones geográficas el que posee la mayor densidad de nodos con bajo valor de intermediación. Al comparar los porcentajes de nodos con alto valor de intermediación, RWP contiene una densidad de nodos del 30 % en valores de intermediación entre el dominio de 100 y 1000 unidades. El porcentaje entregado por este último resulta ser el mayor entre todos los modelos de movilidad. Mientras menor porcentaje de nodos posean un alto valor de intermediación, la robustez disminuirá en la red, puesto que el desprendimiento de estos nodos afecta en gran medida el correcto funcionamiento de la misma [12, 32, 144]. Tomando esto en consideración, la red menos robusta se produce con una WMN operando bajo un entorno de restricciones geográficas; mientras que la red más robusta se produce cuando la WMN se simula con el modelo RWP. Todo este análisis se lo ha realizado tomando en consideración una densidad de 50 nodos en la red.

Distribución de probabilidad con 50 nodos		Modelos de movilidad					
		SWIM	SMOOTH	SLAW	RG	RWP	DisasterArea
Porcentaje de nodos	$BC = 0$	40	38	20	56	28	48
	$0 < BC < 10$	14	28	16	22	12	24
	$10 \leq BC < 100$	36	34	60	20	30	28
	$100 \leq BC < 1000$	10	0	4	2	30	0
	$1000 \leq BC < 10000$	0	0	0	0	0	0

Tabla 5.1: Distribución de métrica de intermediación con 50 nodos en la red

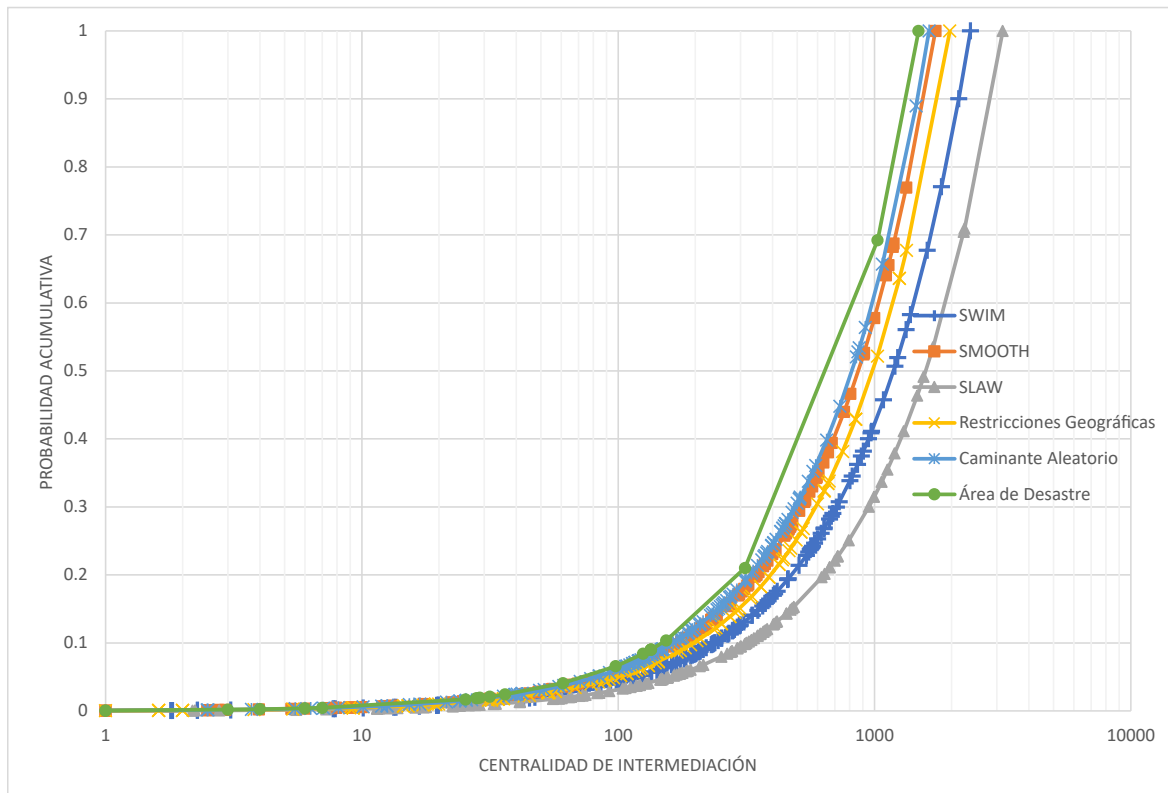


Figura 5.6: Resultados de los distintos modelos de movilidad, comparados mediante la métrica de intermediación. Para esta comparación se estableció 150 nodos dentro del área de simulación.

Continuando con el análisis de la métrica de intermediación, se tiene la Figura 5.5. Para este caso se aumentó el número de nodos en la red de 50 a 100. Al aumentar el número de nodos en la red se observa que las distribuciones de probabilidad descritas en la Figura 5.5, generan tendencias de valores de intermediación más altos respecto a las distribuciones de probabilidad de intermediación descritas en la Figura 5.4. Además, se observa que el dominio de intermediación se ha expandido a valores entre las 1000 y 10000 unidades, más altos que los correspondientes para el caso de 50 nodos.

Dentro de la Figura 5.5, se observa que el modelo SMOOTH posee una tendencia a generar el mayor valor de intermediación, respecto al resto de modelos de movilidad. Tomando en cuenta un orden descendente, los modelos SWIM, restricciones geográficas, SLAW, RWP y área de desastre, contienen una tendencia a formar valores intermediación más bajos, siendo área de desastre quien posee la tendencia más baja respecto al resto de modelos de movilidad. Al tomar en consideración 100 nodos en la red, se observa que el modelo RWP forma

una tendencia de valores de intermediación menores que el resto de modelos de movilidad, excepto con área de desastre. Este modelo en particular tenía un comportamiento distinto cuando se trató con simulaciones con 50 nodos en la red, donde el mismo modelo resultaba poseer una distribución mayor al resto de modelos de movilidad. Esto indica que las distribuciones de probabilidad, para el modelo **RWP**, no se ven afectadas en mayor medida por el cambio de la densidad de nodos. Este comportamiento ocurre de la misma forma para área de desastre, donde no existe un cambio significativo en la distribución de probabilidad, conforme aumenta el número de nodos en la red. Los modelos **SMOOTH**, **SWIM**, restricciones geográficas y **SLAW** sí generan un cambio en la distribución de probabilidad, aumentando su tendencia de valor de intermediación de forma considerable, respecto al modelo **RWP**. Por último, la diferencia entre las distribuciones de probabilidad de área de desastre y el resto de modelos de movilidad es muy notoria. La tendencia de valores de intermediación de área de desastre continúa estando dentro del dominio de las 10 y 100 unidades; mientras que para el resto de modelos de movilidad, el dominio de valores de intermediación se encuentra entre las 100 y 10000 unidades, siendo los modelos **SMOOTH**, **SWIM** y restricciones geográficas quienes tienden a los valores de intermediación más altos. Estos últimos modelos tienen tendencias a valores de intermediación dentro del dominio de las 1000 y 10000 unidades.

Al igual que el análisis propuesto para la red con una densidad de 50 nodos, la Tabla 5.2 muestra los porcentajes correspondientes en simulaciones con 100 nodos, descritos en dominios específicos. De esta manera, se puede observar que, área de desastre posee el mayor porcentaje de nodos con métrica de intermediación igual a cero; mientras que **RWP** posee el menor porcentaje de nodos con esta métrica. Al comparar los valores de la Tabla 5.1, con los valores de la Tabla 5.2, se nota una disminución del 20 % en el porcentaje de nodos con métrica de intermediación igual a cero. Esta disminución de porcentaje de nodos se ve reflejada en todos los modelos de movilidad, excepto en área de desastre, donde el porcentaje de nodos, con métrica de intermediación igual a cero, aumentó en lugar de disminuir. Además, los valores de la Tabla 5.2 muestran que los modelos **SWIM**, restricciones geográficas y **SMOOTH** alcanzaron valores de métrica de intermediación más altos respecto a los valores de descritos en la Tabla 5.1.

Distribución de probabilidad con 100 nodos		Modelos de movilidad					
		SWIM	SMOOTH	SLAW	RG	RWP	DisasterArea
Porcentaje de nodos	$BC = 0$	15	20	11	30	7	78
	$0 < BC < 10$	15	5	10	8	5	17
	$10 \leq BC < 100$	26	25	26	30	32	5
	$100 \leq BC < 1000$	37	47	53	28	56	0
	$1000 \leq BC < 10000$	7	3	0	4	0	0

Tabla 5.2: Distribución de métrica de intermediación con 100 nodos en la red

Por último, en la Tabla 5.2, sin considerar el modelo área de desastre, se puede observar que todos los modelos concentran más del 60 % de los nodos en valores de intermediación entre las 10 y 1000 unidades. Esto indica que, para una densidad de 100 nodos, los modelos de movilidad generan redes más robustas. Sin embargo, considerando únicamente simulaciones con 100 nodos, los modelos **RWP** y **SLAW** generan redes más robustas, puesto que más del 50 % de los nodos se concentran en valores de intermediación entre las 100 y 1000 unidades. Se consideró como referencia el valor de 50 % debido a que se trata de la mitad de nodos en la red.

Finalmente, se consideró distribuciones de probabilidad acumulada para redes con una densidad de 150 nodos. Estas distribuciones de probabilidad de la centralidad de intermediación se ilustran en la Figura 5.6. Nuevamente se nota un crecimiento en la tendencia de valores de intermediación expuestos por todos los

modelos de movilidad. Aunque el cambio no es muy notorio para los modelos SMOOTH, SWIM y RWP, para los modelos SLAW, SWIM y área de desastre sí resulta ser más evidente, si se compara con las distribuciones descritas por los mismos modelos en la Figura 5.5. Esta vez, la tendencia de los valores de intermediación supera las 1000 unidades para todos los modelos de movilidad. El modelo que posee la distribución con mayor tendencia es SLAW. Por otro lado, considerando de forma descendente, los modelos SWIM, restricciones geográficas, SMOOTH, RWP y área de desastre poseen menor valor de tendencia en la métrica de intermediación, siendo área de desastre el modelo con la menor tendencia en el valor de métrica de intermediación, respecto al resto de modelos de movilidad.

Realizando una comparación entre las distribuciones de probabilidad de la centralidad de intermediación descritas en las Figuras 5.4, 5.5 y 5.6, se nota que dichas distribuciones tienden a valores más altos de intermediación, conforme aumenta el número de nodos en la red. Esto se debe a que en la metodología descrita en la Sección 4.1, las áreas de simulación permanecieron constantes, mientras crece únicamente la densidad de nodos. De esta manera, al estar la métrica de intermediación ligada con la ubicación de los nodos, aumenta la probabilidad de que un nodo resulte relevante para la red [80].

Distribución de probabilidad con 150 nodos		Modelos de movilidad					
		SWIM	SMOOTH	SLAW	RG	RWP	DisasterArea
Porcentaje de nodos	$BC = 0$	7.333	8	8	11.333	8	84
	$0 < BC < 10$	7.333	12.667	9.333	13.333	7.333	6
	$10 \leq BC < 100$	14	19.333	24	32.667	17.333	4.667
	$100 \leq BC < 1000$	65.333	56	52	39.333	65.333	4
	$1000 \leq BC < 10000$	6	4	6.667	3.333	2	1.333

Tabla 5.3: Distribución de métrica de intermediación con 150 nodos en la red

Al aumentar una vez más la densidad de nodos en la red, nuevamente se produjo un cambio significativo en el porcentaje de distribución del valor de intermediación. Al comparar los valores de las Tablas 5.2 y 5.3, el porcentaje de nodos con valor de intermediación disminuyó 10 % en promedio aproximadamente en los modelos SWIM, SMOOTH, SLAW y restricciones geográficas. Para el modelo RWP no se notó un cambio significativo. Además, la concentración de nodos, en los valores de intermediación de 10 a 1000 unidades, aumentó a un valor promedio aproximado del 77 % en todos los modelos de movilidad. La concentración de nodos, en todos los modelos de movilidad, excepto área de desastre, tienen una densidad promedio del 55 % en valores de intermediación entre 100 y 1000 unidades. Esto indica que más de la mitad de nodos en la red poseen un índice alto de intermediación, respecto a los valores de las Tablas 5.1 y 5.2. El incremento de nodos ayudó a que todos los modelos, excepto área de desastre, alcancen cifras promedio del 4 % de nodos aproximadamente, con valores de intermediación superiores a 1000 unidades.

Finalmente, como complemento al análisis de los modelos de movilidad, mediante la métrica de centralidad de intermediación, se presenta la Figura 5.7. Ésta muestra los valores promedio de intermediación sobre cada modelo de movilidad, simulados con 50, 100 y 150 nodos. De este modo, sin considerar al modelo área de desastre, RWP es el modelo que presenta mayor valor promedio de intermediación en simulaciones de 50 nodos, mientras que restricciones geográficas presenta el menor valor promedio de intermediación. En redes con 100 nodos, SWIM presenta el mayor valor promedio de intermediación, mientras que RWP presenta el menor valor de esta métrica. En redes con 150 nodos, SWIM es el modelo con mayor valor de intermediación promedio, mientras que SMOOTH contiene el menor valor promedio en esta métrica. Al comparar los valores promedio de la Figura 5.7, con los valores obtenidos en las Tablas 5.1, 5.2 y 5.3, se corrobora que la condensación de

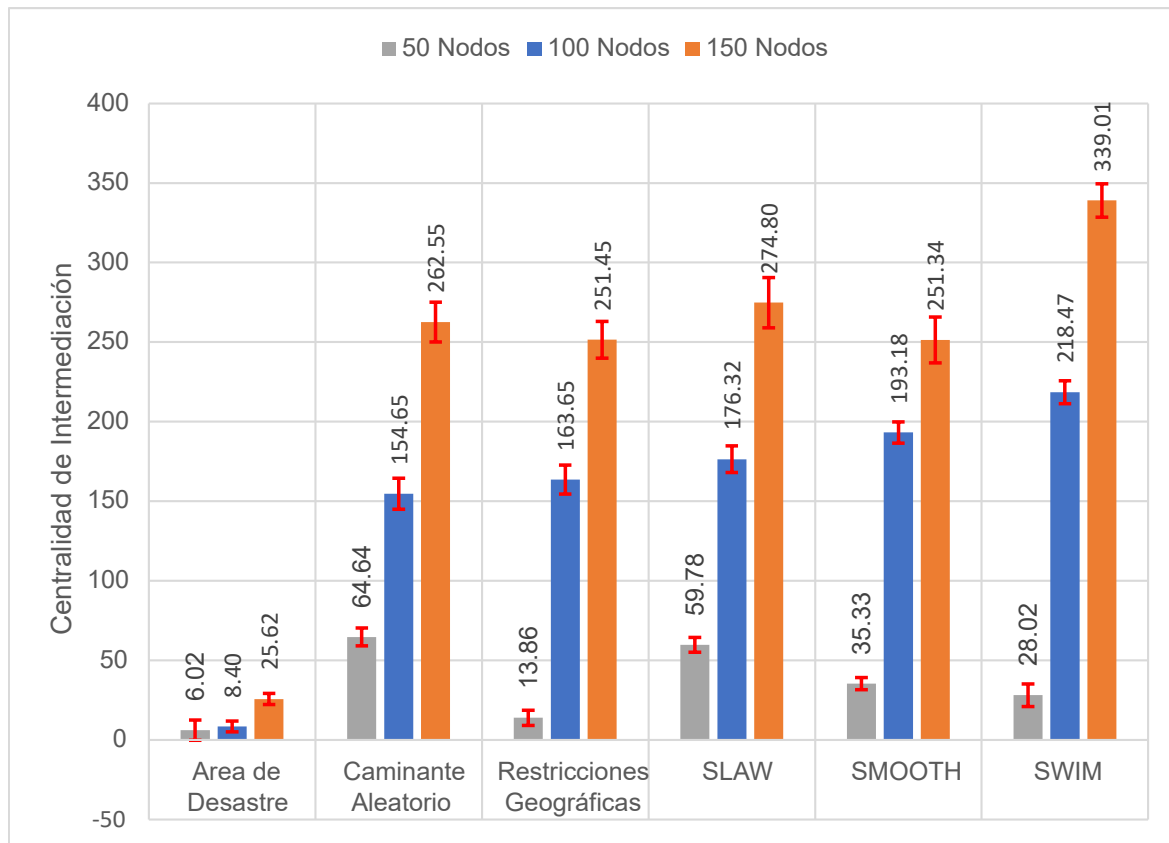


Figura 5.7: Resultados promedio de cada modelo de movilidad obtenidos mediante la métrica de intermediación. Estos resultados se obtuvieron de simulaciones con 50, 100 y 150 nodos. Los valores expuestos en el eje de las ordenadas corresponden a valores descritos por el algoritmo [147].

nodos, en altos índices de intermediación, contribuyen a generar mayor valor promedio en esta misma métrica. Mientras más alto sea el índice de intermediación promedio, mayor será la concentración de nodos en altos índices de intermediación. Se consideró como altos índices de intermediación, a los valores máximos de esta métrica ofrecidos por cada modelo de movilidad. Además, el incremento del número de nodos contribuye al incremento en el valor de intermediación promedio. El aumento de la intermediación promedio ayuda a crear redes más robustas [145, 146].

Dentro del análisis de modelos de movilidad, en torno a la métrica de centralidad de intermediación, se observó que el modelo área de desastre presentaba resultados que diferían del resto de modelos de movilidad. Si se comparan las distribuciones de probabilidad descritas por las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3, se nota que al aumentar el número de nodos, este modelo aumenta el índice de nodos con valor de intermediación igual a cero. Esto indica que la red se vuelve menos robusta con la incorporación de un mayor número de nodos. Este comportamiento es único del modelo área de desastre, por lo cual no pudo generalizarse con el resto de modelos de movilidad. Además, área de desastre no muestra una tendencia a crecer en métrica de intermediación promedio conforme aumenta el número de nodos, tal como lo hacen el resto de modelos de movilidad.

5.1.3. Análisis basado en la métrica de Coeficiente de Agrupamiento

Para el análisis de los modelos de movilidad, empleando la métrica de coeficiente de agrupamiento, se acudió a estudios realizados en [130, 148]. El primer estudio se destaca por establecer gráficos que relacionan el coeficiente de agrupamiento con la métrica de grado. Basado en esta premisa, se presentó la Figura 5.8. El segundo estudio hace uso de los valores promedio del coeficiente de agrupamiento, obtenidos sobre cada modelo de movilidad. Gracias a esto, se obtuvo una idea general del comportamiento del coeficiente de agrupamiento. Bajo esta premisa, se presentó la Figura 5.9. Al igual que en los casos anteriores, las figuras utilizadas para el análisis de esta métrica, presentan simulaciones con WMN de 50, 100 y 150 nodos, todas ocupando los modelos de movilidad establecidos en la Sección 2.2.

En la Figura 5.8 se muestran las distribuciones del coeficiente de agrupamiento descritos por los seis modelos de movilidad. Estas distribuciones relacionan la métrica de grado, en el eje de las abscisas, con el coeficiente de agrupamiento, en el eje de las ordenadas. La métrica de grado representa el número de enlaces en la red, mientras que el coeficiente de agrupamiento se ha descrito como la relación entre el número de triángulos y el número de enlaces en la red. Esta descripción, respecto al coeficiente de agrupamiento, se presentó en la Sección 2.3.5. De esta manera, en la Figura 5.8 se observa que, en simulaciones con 50, 100 y 150 nodos, el modelo con menor distribución de coeficiente de agrupamiento es **SWIM**. En tanto que, el modelo con mayor distribución sobre esta misma métrica es **SLAW**, para todas los casos. Además, dentro de todos los modelos de movilidad, la distribución del coeficiente de agrupamiento se expande conforme aumenta el número de nodos. Esto se debe a que al aumentar el número de nodos en la red, las probabilidades de generar más enlaces entre ellos aumenta. También se puede observar que los modelos **SWIM**, **SMOOTH** y **RWP** presentan distribuciones del coeficiente de agrupamiento estables, respecto al resto de modelos de movilidad, en todas sus simulaciones. Al contrario con lo que sucede con estos tres últimos modelos, **SLAW**, restricciones geográficas y área de desastre, presentan un comportamiento variable en las distribuciones del coeficiente de agrupamiento para todas sus simulaciones. Si se toma esto en consideración, el modelo **RWP** contiene la menor variación del coeficiente de agrupamiento, mientras que el modelo área de desastre contiene la mayor variación en la distribución de esta métrica, en todas las simulaciones realizadas.

Para complementar el análisis realizado en torno a la Figura 5.8, se generó la Tabla 5.4, en la que se presentan los valores de varianza del coeficiente de agrupamiento para cada modelo de movilidad. Al considerar estos valores de varianza, se observa que el modelo con el menor valor de este dato estadístico, en las simulaciones con 50, 100 y 150 nodos, es el modelo **SWIM**. En cambio, el modelo con la mayor varianza, en simulaciones con 50 y 150 nodos, es el modelo restricciones geográficas. El modelo con mayor varianza, en simulaciones con 100 nodos, es **RWP**. De esta manera, realizando un análisis en torno a los datos obtenidos mediante la Tabla 5.4, **SWIM** tiende a generar la menor varianza del coeficiente de agrupamiento, conforme aumenta el número de nodos, mientras que el modelo restricciones geográficas, es el modelo que tiende a formar la mayor varianza sobre esta misma métrica. Para obtener los valores de varianza, se consideró como límite el valor de grado mínimo y máximo en cada modelo de movilidad. Estos valores también se encuentran disponibles en la Tabla 5.4.

Dentro de la misma Tabla 5.4, se ha considerado el coeficiente de agrupamiento acumulado. Este valor se lo obtuvo al sumar el valor del coeficiente de agrupamiento individual de cada nodo dentro de la red. Al comparar los valores de coeficiente de agrupamiento acumulado, en las simulaciones con 50, 100 y 150 nodos, se tiene que el modelo **SLAW** posee el mayor valor, mientras que **SWIM** posee el menor valor. Además, se nota que el coeficiente de agrupamiento acumulado aumenta, conforme aumenta el número de nodos en la red. Este comportamiento sucede debido a que la incorporación de un mayor número de nodos en la red aporta

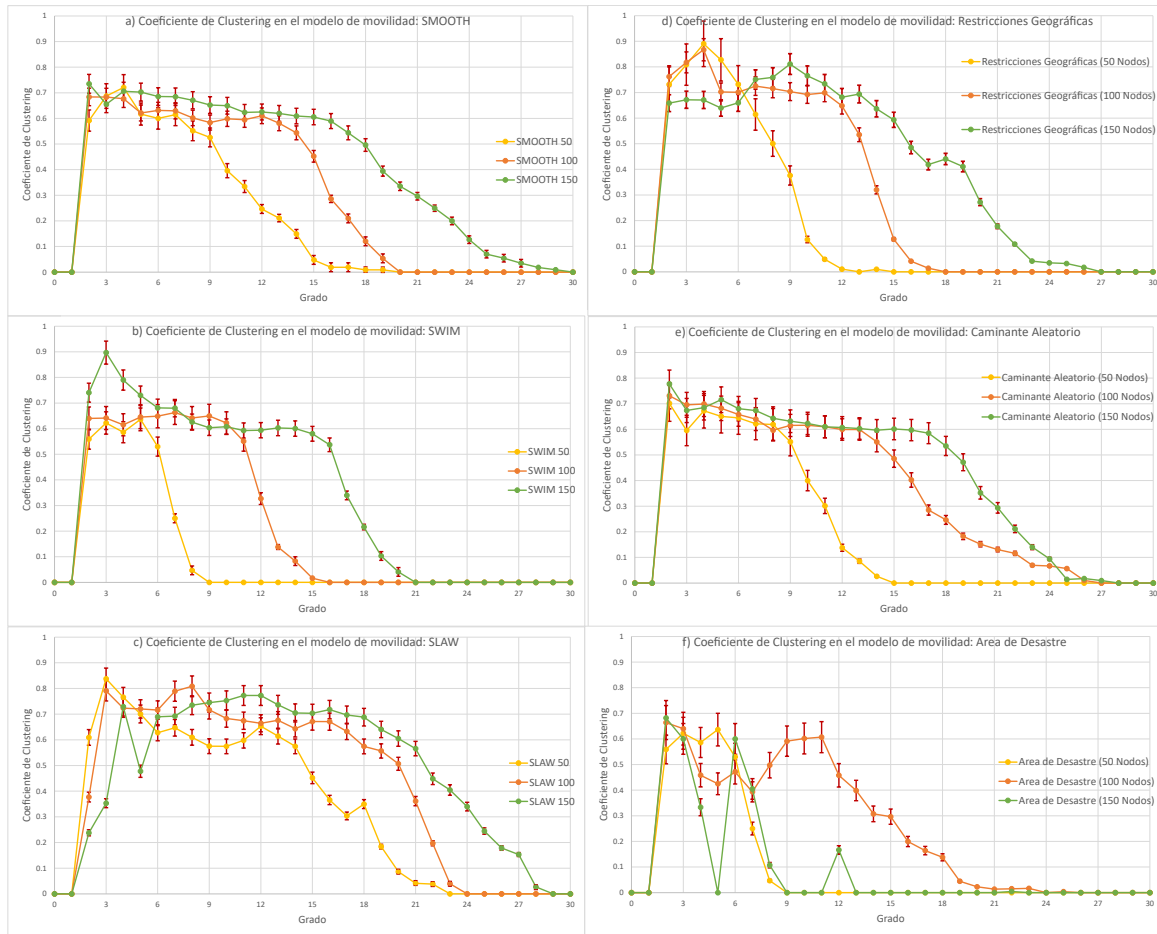


Figura 5.8: Gráficas de distribución del coeficiente de agrupamiento. Estas gráficas se obtuvieron de simulaciones con 50, 100 y 150 nodos sobre los modelos de movilidad: a) SMOOTH, b) SWIM, c) SLAW, d) restricciones geográficas, e) RWP y f) área de desastre.

Valores promedio usando el coeficiente de agrupamiento									
Modelo de movilidad	Área de desastre			RWP			Restricciones geograficas		
Número de nodos	50	100	150	50	100	150	50	100	150
grado máximo	8	25	22	14	26	27	14	17	26
grado mínimo	2	2	2	2	2	2	2	2	2
promedio	0.281	0.222	0.156	0.587	0.609	0.620	0.686	0.693	0.635
varianza	0.075	0.061	0.052	0.070	0.098	0.078	0.178	0.089	0.093
coeficiente agrupamiento acumulado	3.230	7.426	2.898	6.007	10.495	12.441	5.676	9.070	12.164
Modelo de movilidad	SLAW			SMOOTH			SWIM		
Número de nodos	50	100	150	50	100	150	50	100	150
grado máximo	22	23	28	19	19	29	8	15	20
grado mínimo	2	2	2	2	2	2	2	2	2
promedio	0.679	0.706	0.716	0.554	0.599	0.623	0.481	0.624	0.647
varianza	0.090	0.047	0.077	0.107	0.045	0.092	0.043	0.0002	0.056
coeficiente agrupamiento acumulado	10.208	13.194	14.812	6.347	9.160	12.641	3.230	6.881	10.562

Tabla 5.4: Datos estadísticos extraídos sobre cada modelo de movilidad, empleando la métrica de coeficiente de agrupamiento. Los datos contenidos en esta tabla están basados en lo descrito por la Figura 5.8. Se puede observar que ningún modelo de movilidad presenta un grado mínimo menor a dos, lo cual indica que para obtener resultados en el coeficiente de agrupamiento, debe existir mínimo un enlace en cada nodo. Los nodos aislados no se tomaron en consideración para este análisis. La varianza de cada modelo se lo obtuvo entre los valores de grado mínimo y grado máximo.

Modelo	50-100 nodos	100-150 nodos
SWIM	53.058	34.845
SMOOTH	30.711	27.538
SLAW	22.627	10.925
Restricciones geográficas	37.422	25.437
RWP	42.764	15.642
Área de desastre	56.502	60.979

Tabla 5.5: Porcentaje de cambio del coeficiente de agrupamiento acumulado.

con un porcentaje extra de coeficiente de agrupamiento por cada nodo introducido. Pero este comportamiento no se refleja en todos los modelos de movilidad, puesto que en simulaciones con 150 nodos, el modelo de área de desastre disminuye su coeficiente de agrupamiento acumulado. Esta anomalía ocurre dado que área de desastre genera muchos nodos aislados. Entonces, como se mencionó con anterioridad, los nodos aislados no son considerados dentro del análisis para el coeficiente de agrupamiento, por tanto, la contribución al valor acumulado se reduce para este caso en específico.

Al aumentar la cantidad de nodos en la red, existe un cambio en el valor de coeficiente de agrupamiento acumulado, para cada uno de los modelos de movilidad. Este cambio no es similar en todos los modelos. De esta forma, se propone la Tabla 5.5 con el objetivo de identificar diferencias entre los cambios que sufre cada modelo de movilidad. Al observar los valores de esta tabla, se nota que **SWIM** es el modelo que contiene los mayores porcentajes de cambio respecto al resto de modelos de movilidad. En cambio **SLAW** es el modelo que contiene los menores porcentajes de cambio en el valor acumulado. Por otro lado, el modelo **RWP** tiene un porcentaje de cambio mayor en el coeficiente de agrupamiento, en comparación con **SMOOTH** y restricciones geográficas, cuando se aumenta de 50 a 100 nodos en la red. Sin embargo, cuando se aumenta de 100 a 150 nodos en la red, **RWP** tiene menor porcentaje de cambio, en relación a los porcentajes descritos por **SMOOTH** y restricciones geográficas. Esto indica que **RWP** genera una tendencia hacia un menor valor acumulado en el coeficiente de agrupamiento, respecto a los modelos **SMOOTH** y restricciones geográficas. En comparación con el resto de modelos de movilidad, estos tres últimos modelos poseen valores de coeficiente de agrupamiento acumulados muy cercanos entre sí.

Por último, dentro del análisis del coeficiente de agrupamiento, La Figura 5.9 presenta los valores promedio de todos los modelos de movilidad, simulados con 50, 100 y 150 nodos. Al comparar los valores promedio de todos los modelos, excepto con área de desastre, se observa que los mismos están muy próximos entre sí. El incremento de nodos en la red, no afecta de forma significativa al coeficiente de agrupamiento promedio. El modelo **SWIM** presenta un cambio, relativamente grande, respecto al resto de modelos de movilidad. Este cambio se produce al aumentar de 50 nodos a 100 nodos en la red, y representa el 12 % de diferencia en relación con simulaciones de 100 nodos. Esa diferencia en el coeficiente de agrupamiento promedio es despreciable luego de las simulaciones con 100 nodos, llegando a representar una diferencia del 3 % con respecto a las simulaciones de 150 nodos. El modelo de restricciones geográficas tiende a decaer en valor promedio al alcanzar los 150 nodos en la red, pero, la diferencia es mínima, llegando a considerarse una pérdida del 5 %, respecto a las simulaciones anteriores. A pesar de que los valores se encuentran muy próximos entre sí, existe una tendencia a aumentar el valor de esta métrica, conforme más nodos se incorporan en la red. De este modo, el coeficiente de agrupamiento promedio, en todos los modelos de movilidad excepto área de desastre, no se ve fuertemente afectado al incrementar el número de nodos en la red.

El modelo área de desastre genera los porcentajes de cambio más altos de coeficiente de agrupamiento

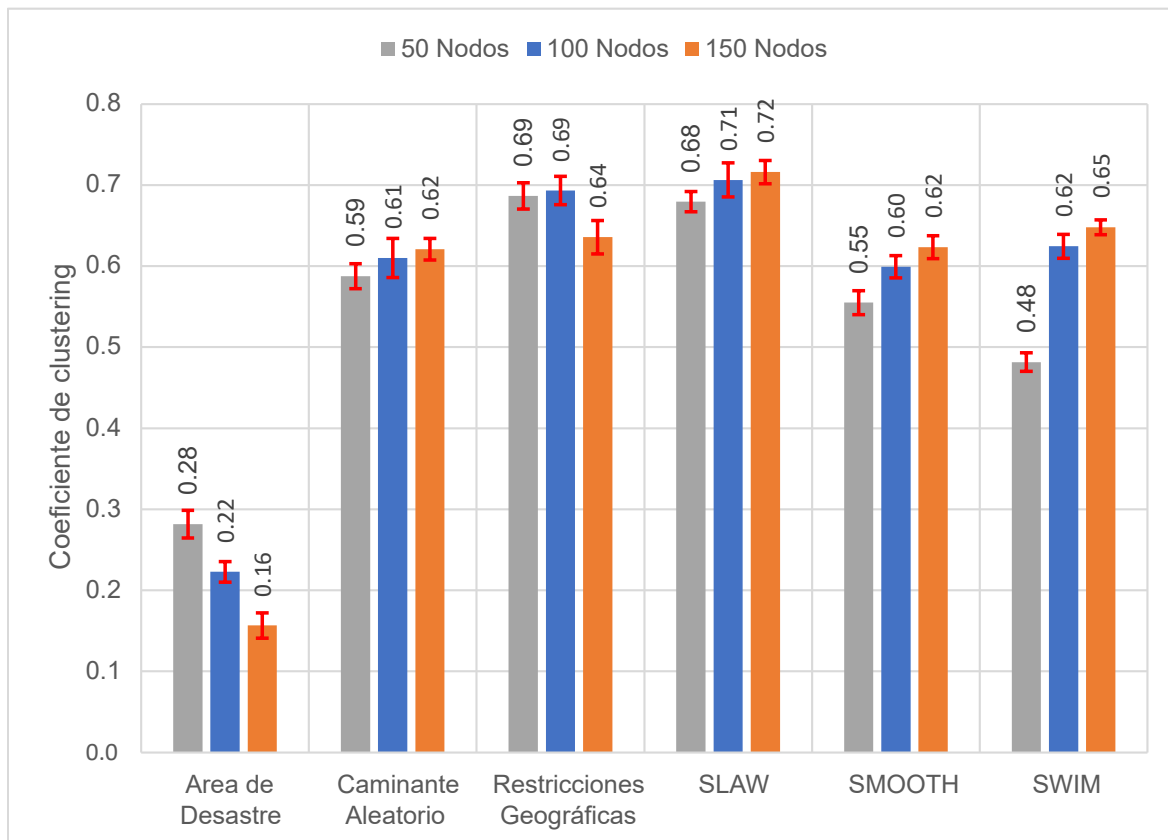


Figura 5.9: Valores promedio basados en el coeficiente de agrupamiento. Estos valores fueron obtenidos para los 6 modelos de movilidad, partiendo de simulaciones con 50, 100 hasta 150 nodos. Los valores expuestos en el eje de las ordenadas se basan en el algoritmo [149].

acumulado. Además, si se considera la Tabla 5.4, se observa que este modelo de movilidad posee un comportamiento irregular en el coeficiente de agrupamiento acumulado, puesto que su valor no aumenta conforme aumenta el número de nodos. De esta manera, en base a estas observaciones, el modelo área de desastre no se consideró dentro del análisis de coeficiente de agrupamiento.

5.1.4. Análisis basado en la métrica de Centralidad de Cercanía

Para el análisis de la métrica de centralidad de cercanía, en la Figura 5.10 se presenta un gráfico de barras que muestra una comparación entre los valores de centralidad de cercanía promedio, obtenidos para los seis modelos de movilidad propuestos. Para las simulaciones se han utilizado WMNs con 50, 100 y 150 nodos respectivamente. Los resultados de la métrica de centralidad cercanía, presentados en la Figura 5.10, se obtuvieron en base al número de saltos promedio entre los nodos.

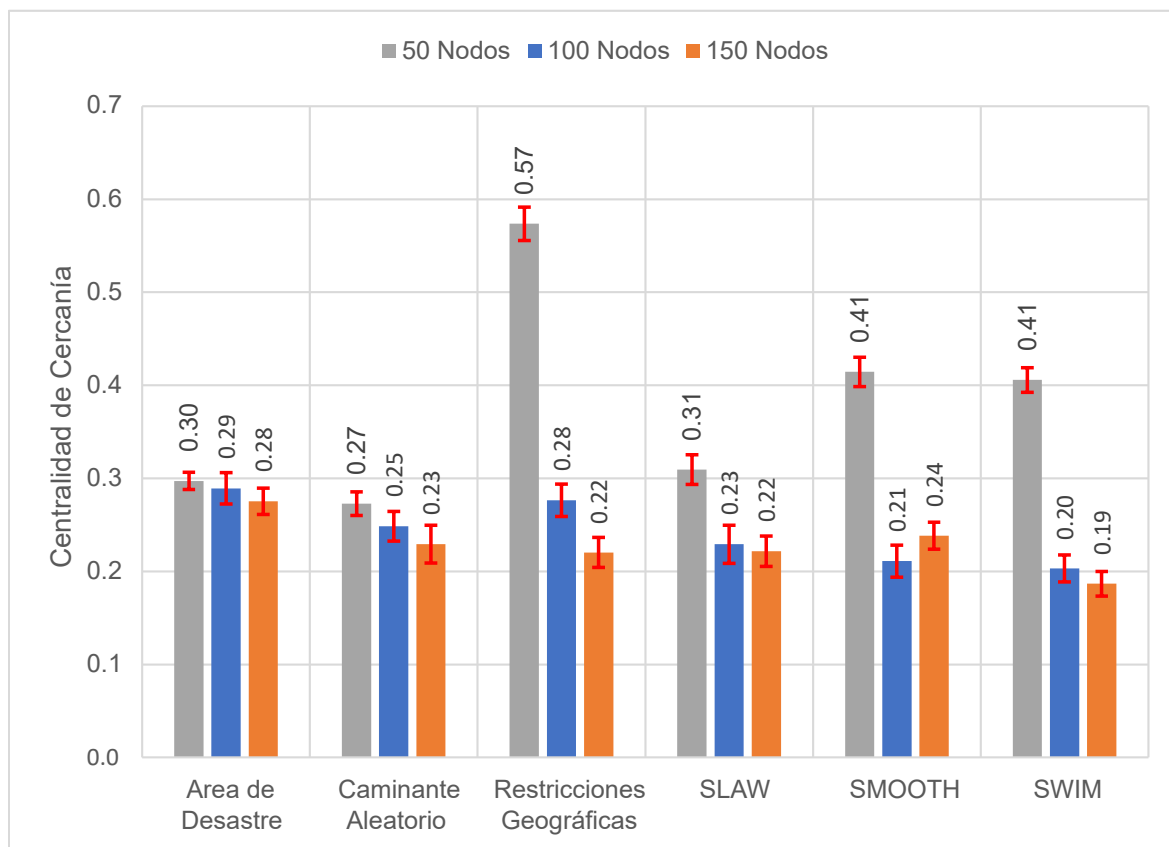


Figura 5.10: Resultados promedio de la métrica de centralidad de cercanía en los diferentes modelos de movilidad con 50, 100 y 150 nodos. Los valores expuestos en el eje de las ordenadas están descritos por el algoritmo [147].

En la Figura 5.10 se observa que, todos los modelos de movilidad tienden a generar un menor valor de centralidad de cercanía promedio conforme se incrementa la cantidad de nodos en la red. Este comportamiento se debe a que la formación de nuevos enlaces permite expandir la longitud de la red. El comportamiento decreciente de los valores promedio, en la Figura 5.10, está presente en todos los modelos de movilidad, excepto en el modelo SMOOTH. Este modelo se comporta de forma particular a los 100 nodos, puesto que su valor promedio es menor al de 150 nodos. Pero, de manera general en todos los modelos de movilidad, la tendencia a decrecer se mantiene. Además, tomando en consideración a **RWP** como un modelo de referencia, se observa de manera

general el comportamiento decreciente en el valor promedio de la métrica de cercanía. Entonces, considerando lo previamente establecido, al aumentar el número de nodos en la red aumenta el tamaño de la misma y por tanto lo hace la probabilidad de necesitar de mayor número de saltos promedio para llegar a los distintos nodos destino. Dicha asunción indica una decadencia en el valor promedio de la métrica de cercanía.

En la misma Figura 5.10 se observa que los valores promedio de la métrica de centralidad de cercanía difieren, en mayor porcentaje, cuando se trabaja con 50 nodos en la red. Al tomar en consideración estas diferencias, el modelo con mayor valor de cercanía promedio es el modelo de restricciones geográficas, mientras que el modelo RWP es el modelo con menor valor promedio. Para las simulaciones con 100 y 150 nodos, la diferencia entre valores promedio resulta muy pequeña. De esta manera, en simulaciones con 100 nodos, el modelo con mayor valor de cercanía promedio continúa siendo restricciones geográficas, mientras que SWIM es el modelo con menor valor promedio en esta métrica. Por último, en simulaciones con 150 nodos, el modelo SMOOTH es el modelo con mayor valor de cercanía promedio, mientras que SWIM es el modelo con menor valor promedio. Este análisis no tomó en consideración el modelo área de desastre.

Adicionalmente, al considerar la Figura 5.10, también se observan grandes variaciones en el valor promedio cuando se enfoca en simulaciones con 50 nodos. Al comparar restricciones geográficas con los modelos propuestos en la Tabla 5.6, se tiene una diferencia porcentual promedio de 38 % aproximadamente. Para simulaciones con 100 y 150 nodos, los porcentajes de diferencia, respecto al modelo con mayor valor promedio de cercanía, son más pequeñas en comparación a simulaciones con 50 nodos. En simulaciones con 100 nodos, restricciones geográficas tiene un porcentaje de diferencia promedio de alrededor del 19 % al compararlo con los modelos de la Tabla 5.7. Si se compara este último porcentaje promedio con el 38 % obtenido a los 50 nodos, se tiene una diferencia del 19 %. Por último, en simulaciones con 150 nodos, SMOOTH tiene un porcentaje de diferencia promedio de 10 % aproximadamente al compararlo con los modelos de la Tabla 5.8. Comparando este último porcentaje, respecto al 19 % obtenido en simulaciones con 100 nodos, se tiene una diferencia de 9 %. De esta manera, se observa una disminución de la diferencia establecida entre los valores promedio obtenidos por cada modelo de movilidad. Entonces, el aumento del número de nodos también contribuye a que los modelos de movilidad generen valores promedio de centralidad de cercanía muy próximos entre sí. Para este análisis tampoco se consideró al modelo de movilidad área de desastre.

De forma individual para cada modelo de movilidad, los porcentajes de variación respecto al valor promedio más alto en cada simulación, tienden a disminuir tal como se muestra en las Tablas 5.6, 5.7 y 5.8. El modelo que sufre mayores tasas de cambio, respecto a modelos con mayor valor de centralidad de cercanía promedio es RWP, mientras que el modelo que menos sufre tasas de cambio es SWIM.

Modelo	Porcentaje (%)
RWP	52.441
SLAW	46.043
SMOOTH	27.755
SWIM	29.271

Tabla 5.6: Diferencia porcentual del valor promedio de la métrica de centralidad de cercanía, tomando como referencia el modelo restricciones geográficas. Esta diferencia se estableció para simulaciones con 50 nodos.

Modelo	Porcentaje (%)
RWP	10.094
SLAW	17.113
SMOOTH	23.625
SWIM	26.483

Tabla 5.7: Diferencia porcentual del valor promedio de la métrica de centralidad de cercanía, tomando como referencia el modelo restricciones geográficas. Esta diferencia se estableció para simulaciones con 100 nodos.

Modelo	Porcentaje (%)
RWP	3.899
Restricciones geográficas	7.631
SLAW	7.086
SWIM	21.719

Tabla 5.8: Diferencia porcentual del valor promedio en la métrica de centralidad de cercanía, tomando como referencia el modelo SMOOTH. Esta diferencia se estableció para simulaciones con 150 nodos.

Por último, para concluir este análisis de modelos de movilidad, basados en la métrica de centralidad de cercanía, se propuso la Tabla 5.9. Esta tabla se obtuvo a partir de los valores promedio descritos en la Figura 5.10. Dentro de esta tabla se tienen las tasas de cambio sobre el valor promedio de cercanía, independientes, de cada modelo de movilidad. Así, mediante la Tabla 5.9 se observa que las tasas de cambio en los modelos restricciones geográficas, SLAW, SMOOTH y SWIM sufren un cambio más fuerte que el resto de modelos, cuando se aumenta de 50 a 100 nodos en la red. El modelo con la tasa de cambio más alta es el modelo restricciones geográficas, alcanzando un 51 % de diferencia entre el valor promedio obtenido entre los 50 y 100 nodos. En cambio, RWP contiene el porcentaje de cambio más bajo, alcanzando un valor de 8 %. Al observar las tasas de cambio, cuando se aumenta de 100 a 150 nodos en la red, los porcentajes se reducen significativamente. Tomando en consideración el cambio de 100 a 150 nodos en la red, restricciones geográficas continúa sufriendo la tasa de cambio más fuerte respecto al resto de modelos de movilidad, alcanzando un valor de 20 %. Por su parte, RWP continúa siendo el modelo con la tasa de cambio mas baja, alcanzando un 7 %. La diferencia del porcentaje entre el modelo con mayor valor y menor valor, obtenido cuando se aumenta de 50 a 100 nodos en la red, es de 43 %; mientras que cuando se aumenta de 100 a 150 nodos, la diferencia es de 13 %. Entonces, la brecha porcentual tiende a disminuir conforme aumenta el número de nodos, lo cual indicaría una tendencia a formar valores promedio, de centralidad de cercanía, muy similares entre todos los modelos de movilidad.

No se consideró el modelo área de desastre dentro de este análisis. La razón de obviar este modelo se debe a que el comportamiento en la tasa de cambio difiere del resto de modelos. En área de desastre, al aumentar el número de nodos, el porcentaje de cambio en el valor promedio tiende a aumentar en lugar de disminuir. Este comportamiento difiere del comportamiento general para el resto de modelos de movilidad.

Modelo	50-100 nodos	100-150 nodos
Area de desastre	2.658	4.839
RWP	8.908	7.767
Restricciones geográficas	51.813	20.297
SLAW	25.977	3.274
SMOOTH	49.059	11.488
SWIM	49.914	8.12

Tabla 5.9: Porcentaje de cambio en la métrica de centralidad de cercanía promedio.

5.1.5. Análisis basado en la métrica de Centralidad de Vector Propio

Para el análisis de la métrica de centralidad vector propio, se presenta la Figura 5.11, que muestra los valores promedio de dicha métrica, obtenidos por los distintos modelos de movilidad, utilizando simulaciones con 50, 100 y 150 nodos en la red.

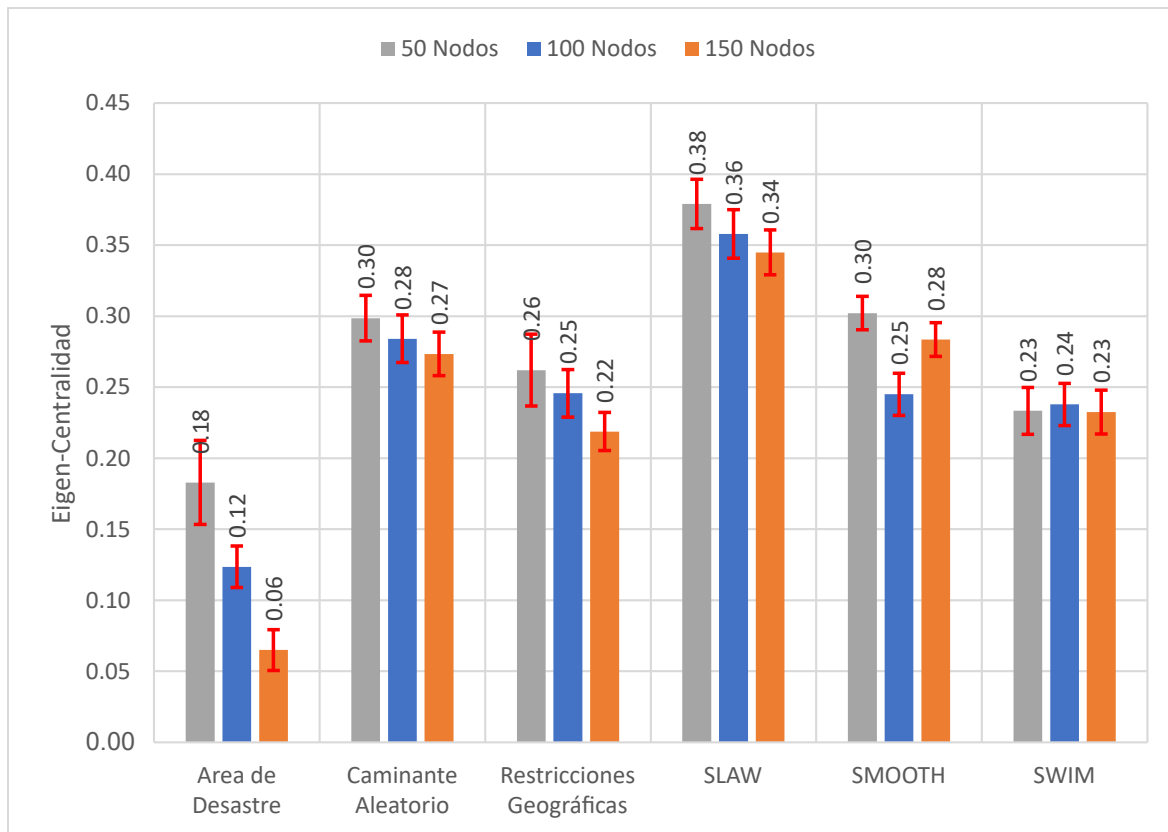


Figura 5.11: Resultados promedio de la métrica de vector propio en los diferentes modelos de movilidad con 50, 100 y 150 nodos. Los valores expuestos en el eje de las ordenadas se describen a lo expuesto en la sección 2.3.4.

Basado en la Figura 5.11, se observa que los valores promedio, para los modelos **RWP**, restricciones geográficas y **SLAW**, disminuyen conforme aumenta la cantidad de nodos en la red. El modelo **SMOOTH** tiene un comportamiento variable conforme aumenta el número de nodos. Esto indica un comportamiento poco predecible para este modelo. Sin embargo, al comparar los resultados obtenidos a 100 y 150 nodos, con los

resultados obtenidos a 50 nodos, se observa un comportamiento decreciente en el valor promedio. Por otra parte, el modelo **SWIM** presenta un comportamiento poco variable al incrementar el número de nodos. La variación en el valor promedio es mínima respecto al resto de modelos de movilidad, la cual se observa en la Tabla 5.13. Por último, el modelo área de desastre presenta resultados que difieren mucho entre el resto de modelos de movilidad. Debido a esta alta diferencia en los valores promedio, el modelo área de desastre se consideró en un análisis separado del resto de modelos de movilidad.

Al comparar los modelos de movilidad en simulaciones con 50 nodos, se observa que el modelo **SLAW** es el que posee el valor promedio más alto de la centralidad de vector propio, respecto al resto de modelos de movilidad. En cambio, el modelo **SWIM** es el que posee el valor promedio más bajo en la métrica de vector propio, sin considerar al modelo área de desastre. De esta manera, en la Tabla 5.10, se observan las diferencias porcentuales entre todos los modelos de movilidad, tomando como referencia el modelo **SLAW**. Respecto a análisis con otras métricas, la métrica de vector propio muestra diferencias porcentuales más leves, llegando a un máximo del 38.45 % de diferencia entre el modelo con mayor y menor valor promedio en esta métrica.

Modelo	Porcentaje (%)
RWP	21.242
Restricciones Geográficas	30.881
SMOOTH	20.294
SWIM	38.455

Tabla 5.10: Diferencia porcentual del valor promedio en la métrica de centralidad de vector propio, tomando como referencia el modelo **SLAW**. Esta diferencia se estableció para simulaciones con 50 nodos.

Al comparar los modelos de movilidad en simulaciones con 100 nodos, el modelo **SLAW** continua siendo el modelo que presenta mayor valor promedio en la métrica de centralidad de vector propio. Por otro lado, sin considerar el modelo área de desastre, el modelo restricciones geográficas es el que presenta el menor valor promedio. Estos datos se corroboran al examinar los resultados obtenidos en la Tabla 5.11, en la que el modelo **SLAW** se ha tomado como referencia nuevamente. Al comparar las Tablas 5.10 y 5.11, se nota una ligera disminución entre las diferencias porcentuales, indicando que existe una menor diferencia entre los valores promedio.

Modelo	Porcentaje (%)
RWP	20.619
Restricciones Geográficas	31.337
SMOOTH	31.533
SWIM	33.523

Tabla 5.11: Diferencia porcentual del valor promedio en la métrica de centralidad de vector propio, tomando como referencia el modelo **SLAW**. Esta diferencia se estableció para simulaciones con 100 nodos.

Al comparar los modelos de movilidad en simulaciones con 150 nodos, el modelo **SLAW** mantiene el valor promedio más alto, de métrica de centralidad de vector propio, respecto al resto de modelos. En cambio, sin considerar el modelo área de desastre, el modelo **SWIM** posee el valor promedio más bajo en la métrica de centralidad de vector propio. Estos datos se corroboran mediante la Tabla 5.12, en la que una vez más se ha tomado al modelo **SLAW** como referencia. Al comparar los resultados de las Tablas 5.10 y 5.11 con 5.12, se

observa un cambio considerable en la diferencia porcentual presentada por el modelo SMOOTH. Este último modelo de movilidad, como se mencionó con anterioridad, presenta un comportamiento variable al aumentar el número de nodos, siendo el modelo con menor diferencia porcentual en comparación con todas las simulaciones realizadas. Por otra parte, el modelo RWP mantiene una diferencia porcentual insignificativa, respecto a SLAW, manteniendo una tasa porcentual de diferencia estable al momento de incrementar la cantidad de nodos. En cambio, el modelo SWIM, respecto al modelo SLAW, tiende a generar menor diferencia porcentual conforme aumenta el número de nodos. Por último, al comparar el modelo restricciones geográficas con el modelo SLAW, se nota un aumento en la diferencia porcentual del valor promedio, conforme aumenta el número de nodos.

Modelo	Porcentaje (%)
RWP	20.723
Restricciones geográficas	36.563
SMOOTH	17.82
SWIM	32.581

Tabla 5.12: Diferencia porcentual del valor promedio en la métrica de centralidad de vector propio, tomando como referencia el modelo SLAW. Esta diferencia se estableció para simulaciones con 150 nodos.

Para comparar las tasas de cambio que presenta cada modelo de movilidad, al aumentar el número de nodos en la red, se propuso la Tabla 5.13. En ésta se puede observar que de la transición de 50 a 100 nodos, el modelo de movilidad restricciones geográficas es el que sufre el mayor cambio; mientras que el modelo SWIM es el que presenta el menor cambio en el valor promedio de la métrica de centralidad de vector propio, esto sin considerar el modelo de movilidad área de desastre. En la transición de 100 a 150 nodos en la red, el modelo que sufre la tasa de cambio más fuerte es restricciones geográficas, mientras que el modelo que sufre el menor cambio, en el valor promedio de vector propio, es SWIM. Tanto para la transición de 50 a 100 y de 100 a 150 nodos en la red, todos los modelos de movilidad, excepto área de desastre, presentan una tasa de cambio mínima, lo cual indica que su valor promedio tendería a mantenerse estable.

El modelo área de desastre se consideró fuera de los análisis anteriores debido a que presentaba diferencias, en el valor promedio de vector propio, muy fuertes respecto al resto de modelos de movilidad. Además, al analizar los cambios porcentuales descritos en la Tabla 5.13, existen diferencias muy marcadas respecto al resto de modelos. De esta manera, realizando un análisis para área de desastre de forma independiente, se indica que es un modelo que tiende a generar valores promedio pequeños, en la métrica de vector propio, conforme aumenta el número de nodos. Por otra parte, los cambios porcentuales descritos en la Tabla 5.13 indican que es un modelo que tiende a generar mayor pérdida de valor promedio, conforme aumenta el número de nodos.

Modelo	50-100 nodos	100-150 nodos
Area de desastre	32.43	47.405
RWP	4.856	3.749
Restricciones geográficas	6.225	10.959
SLAW	5.603	3.622
SMOOTH	18.913	13.556
SWIM	1.924	2.257

Tabla 5.13: Porcentaje de cambio en la métrica de centralidad de vector propio promedio.

De esta manera, tomando en consideración los análisis realizados con anterioridad, se puede concluir que **SLAW** es el modelo de movilidad que presenta los valores promedio más altos en todas las simulaciones. El modelo **SWIM** es el modelo que tiende a generar los valores promedio más estables conforme aumenta el número de nodos. El modelo **SMOOTH** posee un comportamiento variable conforme se incrementa el número de nodos. **RWP** y restricciones geográficas son modelos que tienden a decaer en valor promedio conforme se aumenta el número de nodos. Por último, el modelo área de desastre posee valores promedio muy distantes respecto al resto de modelos de movilidad, al compararlos en las distintas simulaciones.

5.1.6. Análisis basado en la métrica de Excentricidad

Para el análisis de la métrica de excentricidad, en la Figura 5.12 se muestran los valores promedio de dicha métrica, obtenidos para los distintos modelos de movilidad, utilizando simulaciones de 50, 100 y 150 nodos en la red. Dentro de todas las simulaciones realizadas, el área de movilización de los nodos se mantuvo constante. Al igual que en los análisis anteriores, el valor fijado para el área de movilidad se propuso en la Sección 4.1.1.

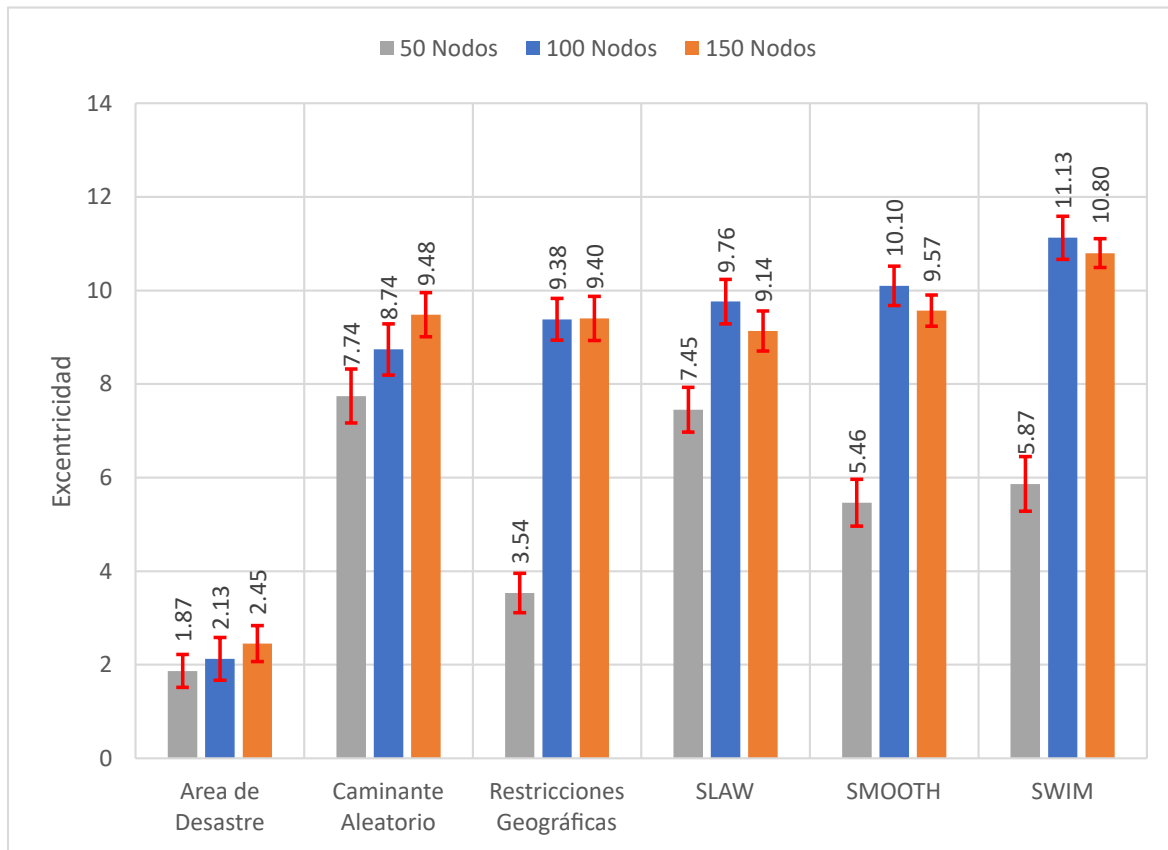


Figura 5.12: Resultados promedio de la métrica de excentricidad en los diferentes modelos de movilidad con 50, 100 y 150 nodos. Los valores expuestos en el eje de las ordenadas se describen acorde a lo presentado en la Sección 2.3.6.

Comenzado con las simulaciones a 50 nodos, se observa una marcada diferencia en el valor promedio, de métrica de excentricidad, entre todos los modelos de movilidad. El modelo que presenta el menor valor promedio es restricciones geográficas, alcanzando un valor de 3.536. En cambio, el modelo que presenta el mayor valor promedio es **RWP**, alcanzando un valor de 7.743. Siguiendo un orden descendente, respecto al valor promedio

de **RWP**, se encuentran los modelos **SLAW**, **SWIM** y **SMOOTH**, cada uno con valores 7.449, 5.865 y 5.461 respectivamente.

Al analizar los resultados obtenidos con 50 nodos, se encontró que el modelo restricciones geográficas presenta una diferencia del 54.32 % con respecto al modelo **RWP**, siendo este valor porcentual la diferencia más grande entre todos los modelos de movilidad. Por otro lado, al comparar los valores promedio de **RWP** y **SLAW**, se presenta una diferencia porcentual de 3.79 %, la cual resulta mucho menor respecto a la diferencia con restricciones geográficas. Para los modelos **SMOOTH** y **SWIM**, las diferencias porcentuales en valor promedio, respecto al modelo **RWP**, son 29.47 % y 24.24 % respectivamente. Estas diferencias en el valor promedio indican que, en simulaciones con 50 nodos, los modelos **RWP**, **SLAW**, **SMOOTH** y **SWIM** son los modelos que contienen nodos más dispersos en la red, en comparación con el modelo restricciones geográficas. Estos resultados se observan mediante la Tabla 5.14. Basándose en el concepto de excentricidad, descrito en la Sección 2.3.6 como la medida de la distancia más larga, el modelo **RWP** representaría mayores distancias respecto al resto de modelos, mientras que restricciones geográficas representaría las menores distancias, en simulaciones con 50 nodos en la red.

Modelo	Porcentaje (%)
SLAW	3.794
Restricciones Geográficas	54.328
SMOOTH	29.472
SWIM	24.242

Tabla 5.14: Diferencia porcentual del valor promedio en la métrica de excentricidad, tomando como referencia el modelo **RWP**, cuyo valor promedio de excentricidad es el más alto de todos los modelos de movilidad. Esta diferencia se estableció para simulaciones con 50 nodos.

Al aumentar el número de nodos, de 50 a 100, se observa que la diferencia entre los valores promedio no difieren en mayor medida, cuando se comparan entre todos los modelos de movilidad. El modelo que presenta el menor valor promedio, respecto a la métrica de excentricidad, es **RWP**, el cual alcanza un valor de 8.741. En cambio, el modelo que presenta mayor valor promedio es **SWIM**, el cual alcanza un valor de 11.127. La diferencia de valores promedio, entre el modelo con mayor y menor valor del mismo, es de 2.386. Este valor es aproximadamente la mitad de la diferencia obtenida, 4.207, en simulaciones con 50 nodos. Al comparar los valores en simulaciones con 50 y 100 nodos, se denota una disminución considerable en la diferencia de valores promedio, lo cual indicaría que los modelos de movilidad tienden a asemejarse más en cuanto a las distancias más largas cuando se incrementa la densidad de nodos en la red.

Además de los valores promedio propuestos para los modelos **SWIM** y **RWP**, los valores promedio para los modelos **SMOOTH**, **SLAW** y restricciones geográficas son 10.10, 9.763 y 9.384 respectivamente. Al comparar todos los valores promedio, de todos los modelos de movilidad con 50 y 100 nodos, se nota un incremento en dicho valor al aumentar el número de nodos. El modelo que sufre el cambio más fuerte es restricciones geográficas, donde el porcentaje de cambio alcanza un valor del 62.31 %. El modelo que menor cambio sufre es **RWP**, el cual alcanza un porcentaje del 11.42 %. Estos porcentajes, y los descritos para el resto de modelos de movilidad, se encuentran exhibidos en la Tabla 5.17.

Al analizar los resultados obtenidos con 100 nodos se encontró que el modelo **RWP** presenta una diferencia del 21.44 % en el valor promedio con respecto al modelo **SWIM**, siendo este valor porcentual la diferencia más grande entre todos los modelos de movilidad. Por otro lado, al comparar los valores promedio entre el modelo **SMOOTH** y **SWIM**, se nota una diferencia porcentual del 9.23 %, siendo esta última la menor entre

todos los modelos de movilidad. Estos porcentajes, al igual que el de los modelos restricciones geográficas y **SLAW**, se encuentran descritos en la Tabla 5.15. A diferencia con las simulaciones con 50 nodos, los modelos de movilidad simulados con 100 nodos no representan un cambio porcentual fuerte, reduciendo significativamente la diferencia entre los valores promedio. A pesar que no se tiene una marcada diferencia entre los valores promedio de todos los modelos de movilidad, las simulaciones a 100 nodos muestran que el modelo **RWP** contiene el menor valor promedio de excentricidad, indicando que las distancias más largas se encuentran en menor cantidad respecto al resto de modelos de movilidad. En cambio, el modelo **SWIM** es el modelo que presenta las distancias más largas en comparación con el resto de modelos de movilidad.

Modelo	Porcentaje (%)
RWP	21.442
Restricciones Geográficas	15.659
SMOOTH	9.232
SLAW	12.252

Tabla 5.15: Diferencia porcentual del valor promedio en la métrica de excentricidad, tomando como referencia el modelo **SWIM**, cuyo valor promedio de excentricidad es el más alto de todos los modelos de movilidad. Esta diferencia se estableció para simulaciones con 100 nodos.

Por último, al aumentar de 100 a 150 nodos en la red, se observa que la diferencia entre valores promedio, de los modelos de movilidad presentados en la Figura 5.12, mantienen una diferencia similar; es decir, no existen cambios bruscos entre los valores promedio. De esta manera, el modelo que presenta el menor valor promedio de excentricidad es **SLAW**, el cual alcanza un valor de 9.136. En cambio, el modelo que presenta el mayor valor promedio es **SWIM**, el cual alcanza un valor de 10.799. La diferencia de valores promedio, entre el modelo con mayor y menor valor del mismo, es de 1.663. Este valor es aproximadamente la mitad de la diferencia obtenida, 2.386, en simulaciones con 100 nodos y aproximadamente la tercera parte de la diferencia obtenida, 4.207, en simulaciones con 50 nodos. A pesar de que no existe un patrón numérico entre cada una de las diferencias presentadas, sí se puede observar que dicha diferencia disminuye conforme aumenta el número de nodos. Al comparar los valores promedio en simulaciones con 100 y 150 nodos, se denota una disminución no muy notable, la cual puede ser verificada en los porcentajes descritos en la Tabla 5.17. De esta manera, las distancias más largas alcanzadas por los modelos de movilidad, no producen diferencias significativas entre simulaciones con 100 y 150 nodos en la red. Los valores promedio de excentricidad, para los modelos **SMOOTH**, **RWP** y restricciones geográficas son 9.571, 9.48 y 9.403, y se encuentran en orden descendente respectivamente.

Al comparar todos los valores promedio, de todos los modelos de movilidad con 100 y 150 nodos, se nota un ligero cambio en dicho promedio, no tan brusco como ocurrió en la transición de 50 a 100 nodos en la red. De esta manera, el modelo que sufre el cambio más fuerte, en su valor promedio, es **RWP**, donde el porcentaje de cambio alcanza un valor del 7.79 %. Por otro lado, el modelo que menor cambio sufre es restricciones geográficas, el cual alcanza un porcentaje del 0.19 %. Estos porcentajes, y los descritos para el resto de modelos de movilidad, se encuentran exhibidos en la Tabla 5.17.

Al analizar los resultados obtenidos con 150 nodos se encontró que el modelo **SLAW** presenta una diferencia del 15.395 % en el valor promedio con respecto al modelo **SWIM**, siendo este valor porcentual la diferencia más grande entre todos los modelos de movilidad. Por otro lado, al comparar los valores promedio entre el modelo **SMOOTH** y **SWIM**, se nota una diferencia porcentual del 11.375 %, siendo esta última la menor entre todos los modelos de movilidad. Estos porcentajes, al igual que el de los modelos **RWP** y restricciones geográficas, se encuentran descritos en la Tabla 5.16. Al igual que en las simulaciones con 100 nodos, los modelos de movilidad

simulados con 150 nodos representan un cambio porcentual leve, manteniendo un promedio aproximadamente similar entre los valores de excentricidad de cada modelo. Sin embargo, la diferencia entre modelo y modelo continua siendo notable. De esta manera, el modelo **SLAW** contiene el menor valor promedio de excentricidad, indicando que las distancias más largas se encuentran en menor cantidad respecto al resto de modelos de movilidad. En cambio, el modelo **SWIM** es el modelo que presenta las distancias más largas en comparación con el resto de modelos de movilidad.

Modelo	Porcentaje (%)
RWP	12.216
Restricciones geográficas	12.928
SMOOTH	11.375
SLAW	15.396

Tabla 5.16: Diferencia porcentual del valor promedio en la métrica de excentricidad, tomando como referencia el modelo **SWIM**, cuyo valor promedio de excentricidad es el más alto de todos los modelos de movilidad. Esta diferencia se estableció para simulaciones con 150 nodos.

Modelo	50-100 nodos	100-150 nodos
Area de desastre	12.237	13.339
RWP	11.421	7.792
Restricciones geográficas	62.318	0.195
SLAW	23.707	6.425
SMOOTH	45.931	5.239
SWIM	47.283	2.948

Tabla 5.17: Porcentaje de cambio en la métrica de excentricidad promedio.

Dentro de todo este análisis no se consideró al modelo de movilidad área de desastre. Esto se debe a que dicho modelo presentó diferencias, en el valor promedio de excentricidad, muy distantes respecto al resto de modelos de movilidad presentados en la Figura 5.12. Sin embargo, el comportamiento del modelo área de desastre resulta ser creciente, en valor promedio respecto a la métrica de excentricidad, al incrementar el número de nodos en la red.

La métrica de excentricidad se relaciona con la distancia entre los nodos de la red; motivo por el cual si tenemos una medida de excentricidad promedio muy pequeña, entonces tendremos redes con nodos más cercanos entre sí. De esta manera, el modelo con menor excentricidad promedio a 50 nodos es restricciones geográficas, mientras que el modelo con mayor valor promedio es **RWP**. El modelo con menor excentricidad promedio a 100 nodos es **RWP**, mientras que el modelo con mayor valor promedio es **SWIM**. Por último, el modelo con menor excentricidad promedio a 150 nodos es **SLAW**, mientras que el modelo con mayor valor promedio es **SWIM**.

Entonces, al aumentar el número de nodos en la red, existe una tendencia al incremento en el valor promedio de excentricidad en todos los modelos de movilidad. Aunque esta tendencia se observa de mejor manera en la transición de 50 a 100 nodos, el cambio de 100 a 150 nodos resulta poco relevante, e inclusive disminuye para los modelos **SLAW**, **SMOOTH** y **SWIM**. Debido a que el cambio entre estos últimos modelos es poco representativo, se generalizó la tendencia de aumento para todos los modelos de movilidad, basándose en el cambio fuerte existente en la transición de 50 a 100 nodos.

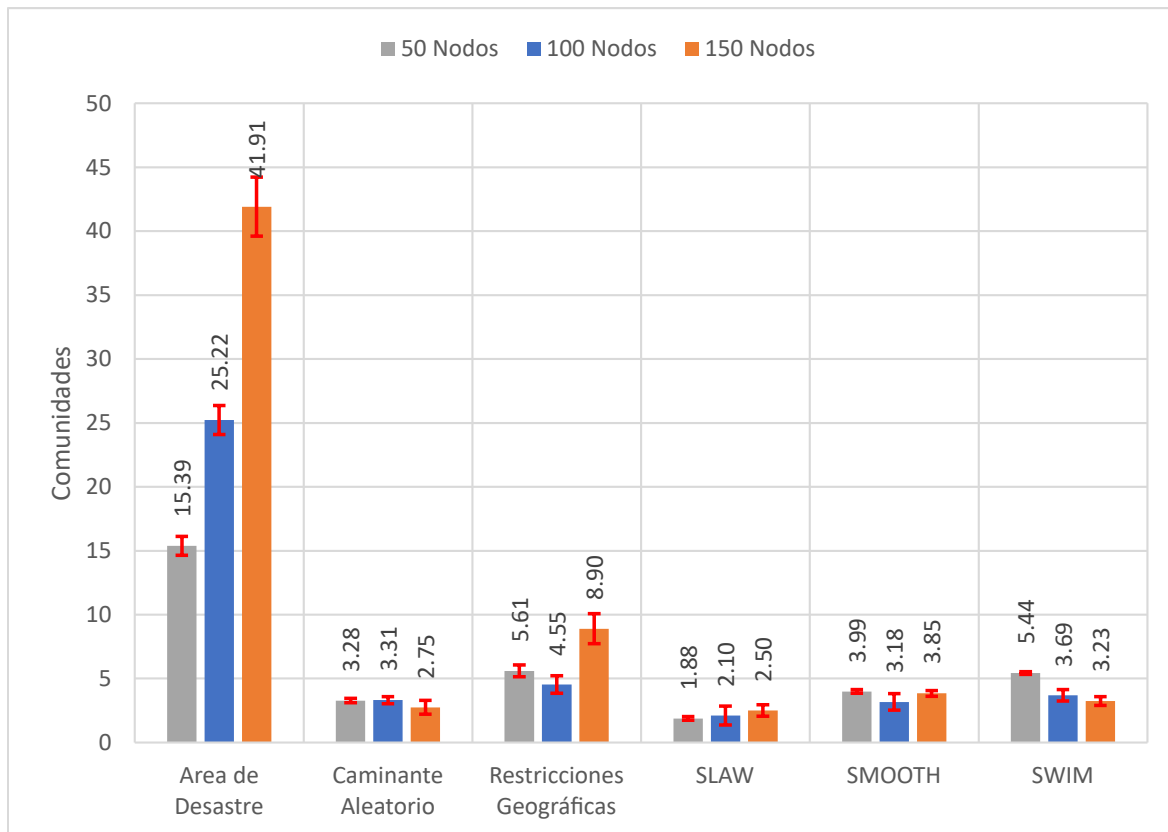


Figura 5.13: Resultados promedio del número de comunidades generadas con 50, 100 y 150 nodos. Los valores descritos en el eje de las ordenadas están basados en el algoritmo [82].

5.1.7. Análisis basado en la métrica de Modularidad

El análisis de modelos de movilidad basados en la métrica de modularidad es complementaria, respecto al resto de análisis presentados. Tal como se mencionó en la Sección 2.4, esta métrica se estudia con la finalidad de brindar apoyo a las métricas de vector propio, excentricidad y coeficiente de agrupamiento, en el análisis de la metodología definida como **cliente-servidor**. Dicho análisis se encuentra descrito en la Sección 5.2.

De momento, enfocándose en el análisis de modelos de movilidad basados en la métrica de modularidad, se planteó la Figura 5.13. Los resultados descritos en esta figura son promedios de los resultados denominados **clase**. La clase es un identificador que se le asigna a cada nodo para indicar a qué comunidad pertenece. El número total de clases indicará el total de comunidades generadas en la red. De esta manera, la Figura 5.13 muestra el impacto de la métrica de modularidad en los distintos modelos de movilidad planteados, trabajando con WMNs con densidades de 50, 100 y 150 nodos.

De todos los modelos de movilidad descritos en la Figura 5.13, área de desastre es el modelo que presenta mayor valor promedio en el número de comunidades generadas. Este modelo genera una mayor cantidad de comunidades, respecto al resto de modelos de movilidad, debido a la existencia de una gran cantidad de nodos aislados en la red. De acuerdo con [82], algoritmo usado en Gephi para extraer resultados en la métrica de modularidad, un nodo aislado cuenta como una comunidad independiente. Entonces, al aumentar la cantidad de nodos aislados en la red, área de desastre tiende a generar una mayor cantidad de comunidades que el resto de modelos de movilidad.



Sin considerar al modelo área de desastre, en la Figura 5.13 se observa que todos los modelos de movilidad presentan valores promedio de comunidades que varían entre los valores 1.88 y 8.90. El modelo con el mayor valor promedio, en simulaciones con 50, 100 y 150 nodos, es restricciones geográficas. Por su parte, **SLAW** es el modelo que presenta el menor valor promedio en todas las simulaciones. Además, entre todos los modelos de movilidad, no existe un patrón o comportamiento relacionado entre el valor promedio de comunidades con el aumento en el número de nodos. Entonces, el aumento de número de nodos en la red no afecta al número de comunidades generadas en los modelos de movilidad, excepto cuando se trata de área de desastre.

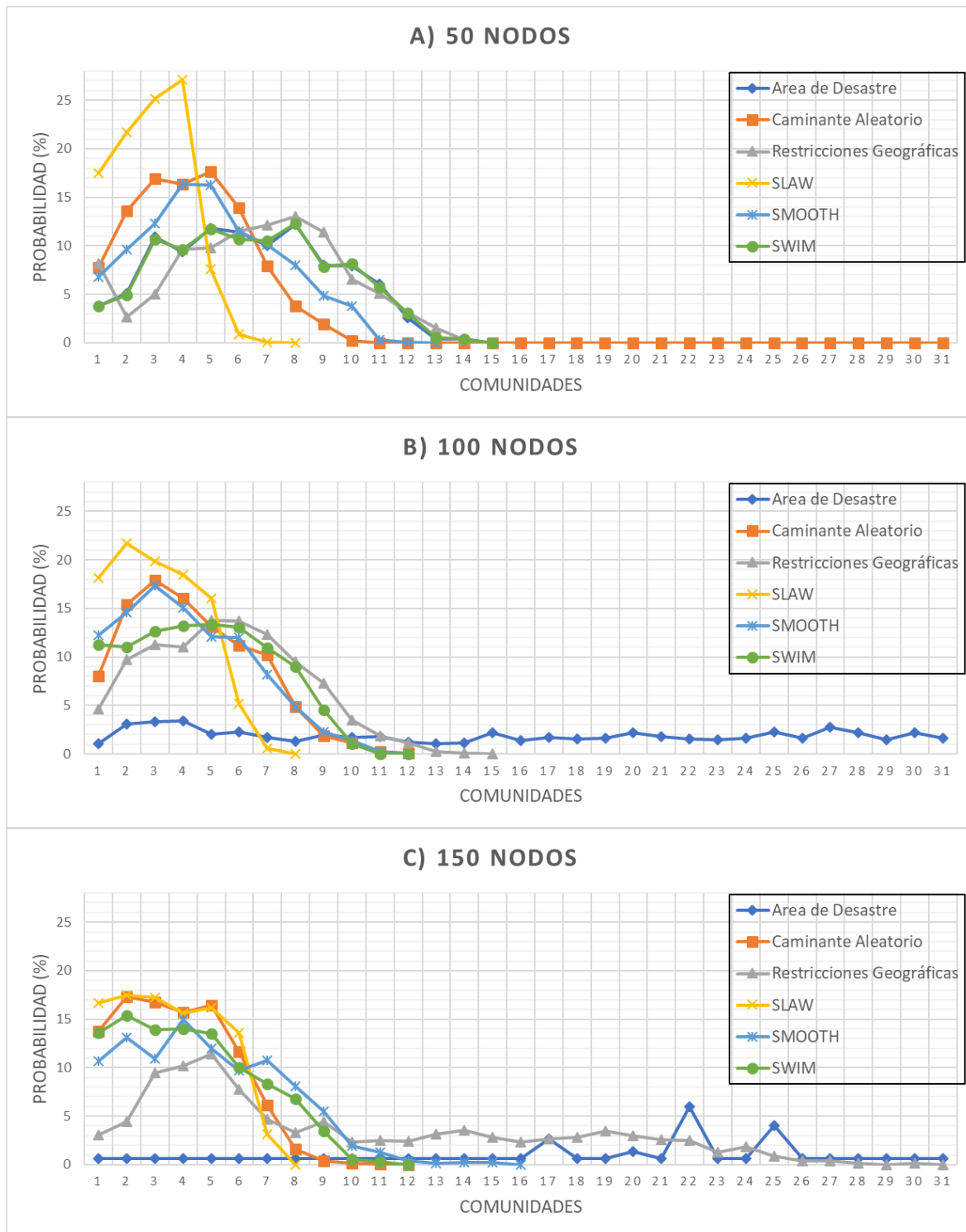


Figura 5.14: Resultados de las funciones de distribución de probabilidad de comunidades en los diferentes modelos de movilidad generadas con 50, 100 y 150 nodos.

Para analizar las distribuciones de probabilidad de la cantidad de comunidades, en la Figura 5.14 se muestra el comportamiento de todos los modelos de movilidad conforme aumenta la cantidad de nodos en la red. A pesar que el número de nodos aumenta, no existe una variación significativa en el número de comunidades generadas,

puesto que las distribuciones de probabilidad tienden a mantenerse similares en todo momento. De esta manera, se corrobora que no existe una relación directa entre el aumento en el número de nodos y las comunidades generadas en la red. Para generar la Figura 5.14, se colocó el número de comunidades generadas en el eje de las abscisas y el porcentaje de nodos, que pertenecen a comunidades específicas, en el eje de las ordenadas.

En cada simulación, presentada por cada modelo de movilidad, existen variaciones al incrementar el número de nodos en la red. Estas variaciones se describen en las Tablas 5.18, 5.19 y 5.20 en formato porcentual. Al comparar los valores de dichas tablas, se observa que existe mayor diferencia de valores promedio cuando se realizan simulaciones con 150 nodos, alcanzando un porcentaje promedio de 65 %. En cambio, para simulaciones con 50 y 100 nodos, las variaciones son casi similares, alcanzando el 34 % y 32 % respectivamente. Una vez más, al comparar los valores descritos en estas tablas, se observa que no existe una relación directa entre el valor promedio de comunidades y el cambio en la densidad de nodos.

Modelo	Porcentaje (%)
RWP	41.472
SLAW	66.394
SMOOTH	28.739
SWIM	3.036

Tabla 5.18: Diferencia porcentual del valor promedio en la métrica de modularidad, tomando como referencia el modelo restricciones geográficas. Esta diferencia se estableció para simulaciones con 50 nodos.

Modelo	Porcentaje (%)
RWP	27.096
SLAW	53.712
SMOOTH	30.079
SWIM	18.893

Tabla 5.19: Diferencia porcentual del valor promedio en la métrica de modularidad, tomando como referencia el modelo restricciones geográficas. Esta diferencia se estableció para simulaciones con 100 nodos.

Modelo	Porcentaje (%)
RWP	69.088
SLAW	71.855
SMOOTH	56.774
SWIM	63.655

Tabla 5.20: Diferencia porcentual del valor promedio en la métrica de modularidad, tomando como referencia el modelo restricciones geográficas. Esta diferencia se estableció para simulaciones con 150 nodos.

Al comparar los resultados de área de desastre, respecto al resto de modelos presentados en la Figura 5.13, se nota que dicho modelo difiere en gran medida el valor promedio de comunidades. Debido a este comportamiento, área de desastre dejó de considerarse dentro del análisis con la métrica de modularidad, porque el número mayor de comunidades generadas corresponde principalmente al alto porcentaje de nodos aislados en la red, en lugar de una estructura topológica especial.

5.1.8. Resumen

Este apartado se generó con la finalidad de ofrecer un esquema resumido de todos los análisis previamente descritos. En la Tabla 5.21, se observan todos los resultados promedio, obtenidos de todos los modelos de movilidad bajo las siete métricas de estudio. Cada uno de estos valores fueron establecidos en simulaciones de WMNs con 50, 100 y 150 nodos. Adicionalmente, la Figura 5.15 presenta los resultados normalizados, de todos los modelos de movilidad y métricas de centralidad analizadas, para el caso de la WMN con 100 nodos. Los resultados para simulaciones con 50 y 150 nodos se exponen en el Anexo A. La razón de considerar estas dos últimas simulaciones por separado, se debe a que en la Sección 5.2 se consideró simulaciones únicamente con 100 nodos.

Modelo	Centralidad de Grado	Excentricidad	Centralidad de Cercanía	Centralidad de Intermediación	Coefficiente de Clustering	Comunidades	Eigen-Centralidad
Área de Desastre [50 Nodos]	3.0082	1.8659	0.2972	6.0213	0.2816	15.3931	0.1829
Área de Desastre [100 Nodos]	2.5702	2.1261	0.2893	8.399	0.2229	25.2231	0.1236
Área de desastre [150 Nodos]	1.6	2.4533	0.2753	25.62	0.1566	41.9067	0.065
Caminante Aleatorio [50 Nodos]	5.3207	7.743	0.2728	64.6407	0.5876	3.281	0.2986
Caminante Aleatorio [100 Nodos]	8.7626	8.7413	0.2485	154.6515	0.6099	3.3143	0.2841
Caminante Aleatorio [150 Nodos]	11.0658	9.48	0.2292	262.551	0.621	2.7505	0.2734
Restricciones Geográficas [50 Nodos]	4.1607	3.5364	0.5736	13.857	0.6866	5.6059	0.262
Restricciones Geográficas [100 Nodos]	6.9059	9.3848	0.2764	163.6544	0.6933	4.5461	0.2457
Restricciones Geográficas [150 Nodos]	8.3937	9.4031	0.2203	251.4485	0.6357	8.8977	0.2188
SLAW [50 Nodos]	8.5987	7.4492	0.3095	59.7784	0.6796	1.8839	0.3791
SLAW [100 Nodos]	11.7882	9.7639	0.2291	176.321	0.7064	2.1043	0.3579
SLAW [150 Nodos]	14.44	9.1366	0.2216	274.8021	0.7161	2.5043	0.3449
SMOOTH [50 Nodos]	5.1948	5.461	0.4144	35.3266	0.555	3.9948	0.3022
SMOOTH [100 Nodos]	7.5911	10.1001	0.2111	193.179	0.5991	3.1787	0.245
SMOOTH [150 Nodos]	10.7864	9.5708	0.2385	251.3435	0.6234	3.8461	0.2834
SWIM [50 Nodos]	3.0951	5.8659	0.4057	28.0213	0.4816	5.4357	0.2333
SWIM [100 Nodos]	6.1616	11.1272	0.2032	218.4749	0.6246	3.6872	0.2379
SWIM [150 Nodos]	8.9244	10.7992	0.1867	339.0137	0.648	3.2339	0.2325

Tabla 5.21: Tabla de resumen métricas correspondiente a cada modelo de movilidad simulado con 50, 100 y 150 nodos

Para el análisis de la WMN con tráfico, descrito en la Sección 5.2, mediante la Figura 5.15, se escogieron únicamente los modelos de movilidad que representaban los valores promedio más altos y más bajos, basados en cada métrica de teoría de grafos. Dentro de esta consideración, se evitó escoger el modelo de movilidad área

de desastre y **RWP**. Esto debido a que el modelo área de desastre presentaba resultados exclusivos respecto al resto de modelos de movilidad, mientras **RWP** se lo consideró un modelo referencial, el cual ayudó únicamente a marcar tendencias sobre los modelos realistas. De esta manera, los modelos que se tomaron en consideración para el análisis de la Sección 5.2 son **SWIM**, **SMOOTH**, **SLAW** y restricciones geográficas.

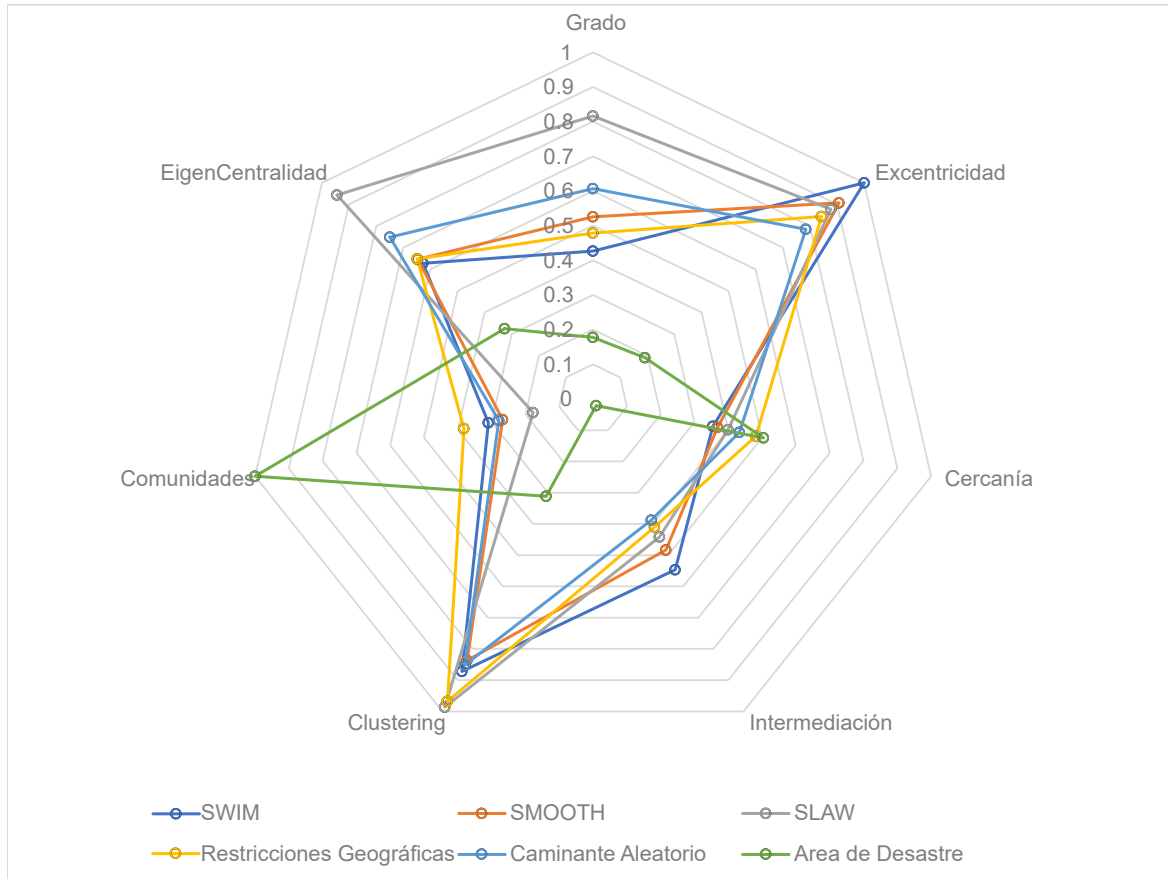


Figura 5.15: Gráfico de resumen donde se muestran los resultados de los modelos de movilidad, comparados usando las distintas métricas de teoría de grafos establecidas. Este gráfico se obtuvo de las simulaciones donde participaron 100 nodos en la red.

5.2. Análisis del desempeño de red

En esta sección se realizó un análisis de integridad y robustez de red sobre todas las métricas de teoría de grafos descritas, comparando los modelos de movilidad que presentaron los valores promedio más altos y más bajos en cada métrica. Este análisis consistió en estudiar el comportamiento general de red bajo la perspectiva de la tasa de entrega de paquetes, conforme se desprendían distintos nodos de la red. Este desprendimiento de nodos tuvo repercusiones fuertes sobre las métricas de grado, intermediación y cercanía; mientras que en las métricas de excentricidad, vector propio y coeficiente de agrupamiento, el mismo análisis de integridad y robustez aplicado, presentaron resultados con cambios poco significativos. Los resultados de estas tres últimas métricas se aprecian en el Anexo A. Debido a la falta de relevancia presentada por los resultados de estas tres últimas métricas, se planteó una nueva metodología, la cual se describe en la Sección 4.2.4. Mediante esta metodología, se realizó un análisis de retardo sobre las métricas de excentricidad y vector propio, mientras que

la métrica de coeficiente de agrupamiento se la analizó mediante el uso de [PDR](#).

Para todos los análisis descritos en esta sección, se tomó como punto de partida los resultados promedio de los modelos de movilidad presentados en la Figura 5.15. Estos resultados promedio se obtuvieron a partir de las siete métricas de teoría de grafos, las cuales son analizadas en esta sección de la siguiente manera:

- **Centralidad de Grado:** Se realizan pruebas de robustez de red en el modelo de movilidad [SLAW](#) por presentar un valor promedio más alto de centralidad de grado, y en [SWIM](#) por ser el modelo con menor valor promedio de esta métrica.
- **Centralidad de Intermediación:** Se realizan pruebas de robustez de red en el modelo de movilidad [SWIM](#) por presentar un valor promedio más alto de centralidad de intermediación, y en el modelo restricciones geográficas por tener el menor valor promedio de esta métrica.
- **Centralidad de Cercanía:** Se realizan pruebas de robustez de red en el modelo de movilidad de restricciones geográficas por presentar un valor promedio más alto de centralidad de cercanía, y en el modelo [SWIM](#) por tener el menor valor promedio de esta métrica.
- **Excentricidad:** Se realizan pruebas de robustez en el modelo de movilidad [SWIM](#) por presentar un valor promedio más alto de excentricidad en la red, y en el modelo restricciones geográficas por tener el menor valor promedio de esta métrica. Además, se incluye un segundo tipo de evaluación que consiste en convertir a uno de los nodos en un servidor, al cual distintos nodos concurren con peticiones de información.
- **Centralidad de Vector Propio:** Los modelos de especial interés en esta métrica son [SLAW](#) y [SWIM](#), debido a que dichos modelos presentan un alto valor promedio de centralidad de vector propio y un bajo valor promedio de dicha métrica respectivamente. Basándose en esta métrica, se realizaron pruebas de robustez y de *clusters* de servidores, con el objetivo de evaluar los tiempos de respuesta en la red.
- **Coefficiente de agrupamiento:** En este caso se trabajó con los modelos de movilidad [SLAW](#) y [SMOOTH](#), debido a que el primero presenta el mayor valor promedio de coeficiente de agrupamiento en la red y el segundo presenta el menor valor promedio en esta métrica. En este caso se observó que una prueba de robustez no es significativa, motivo por el cual se optó por realizar pruebas de implementación de *clusters* de servidores de contenido en la red.

Las pruebas de *clusters* de servidores, a los que se refieren en el análisis de las métricas de excentricidad, vector propio y coeficiente de agrupamiento, fueron pruebas realizadas en conjunto con la métrica de modularidad. Gracias a esta última métrica, se generaron comunidades que fueron analizadas para implementar la metodología descrita en la Sección 4.2.4.

5.2.1. Impacto de la métrica de Centralidad de Grado en las redes en Malla

Comenzando por la métrica de centralidad grado, en la Figura 5.16, se observa la tasa de entrega de paquetes, [PDR](#), en función de la cantidad de nodos que se desprenden de la red. Para este caso, los modelos [SLAW](#) y [SWIM](#) fueron considerados, los cuales representan el modelo con mayor y menor valor promedio en la métrica de grado respectivamente. La diferencia porcentual, en el valor de [PDR](#) entre estos dos modelos, resulta ser mínima hasta el 6 % de nodos desprendidos en la red. La diferencia de [PDR](#) hasta este punto no supera el 2 % entre los dos modelos. Pasado el 6 % de nodos desprendidos en la red, la diferencia de [PDR](#) entre estos dos modelos alcanza una cifra de hasta el 5.71 %. Esto indica que el modelo [SWIM](#) resulta más afectado, por el desprendimiento de nodos, cuando se trata de la métrica de grado. Sin embargo, el impacto generado por el

desprendimiento de nodos no degrada el **PDR** de los modelos en cifras inferiores al 80 %, esto considerando que el máximo número de nodos desprendidos es del 10 %.

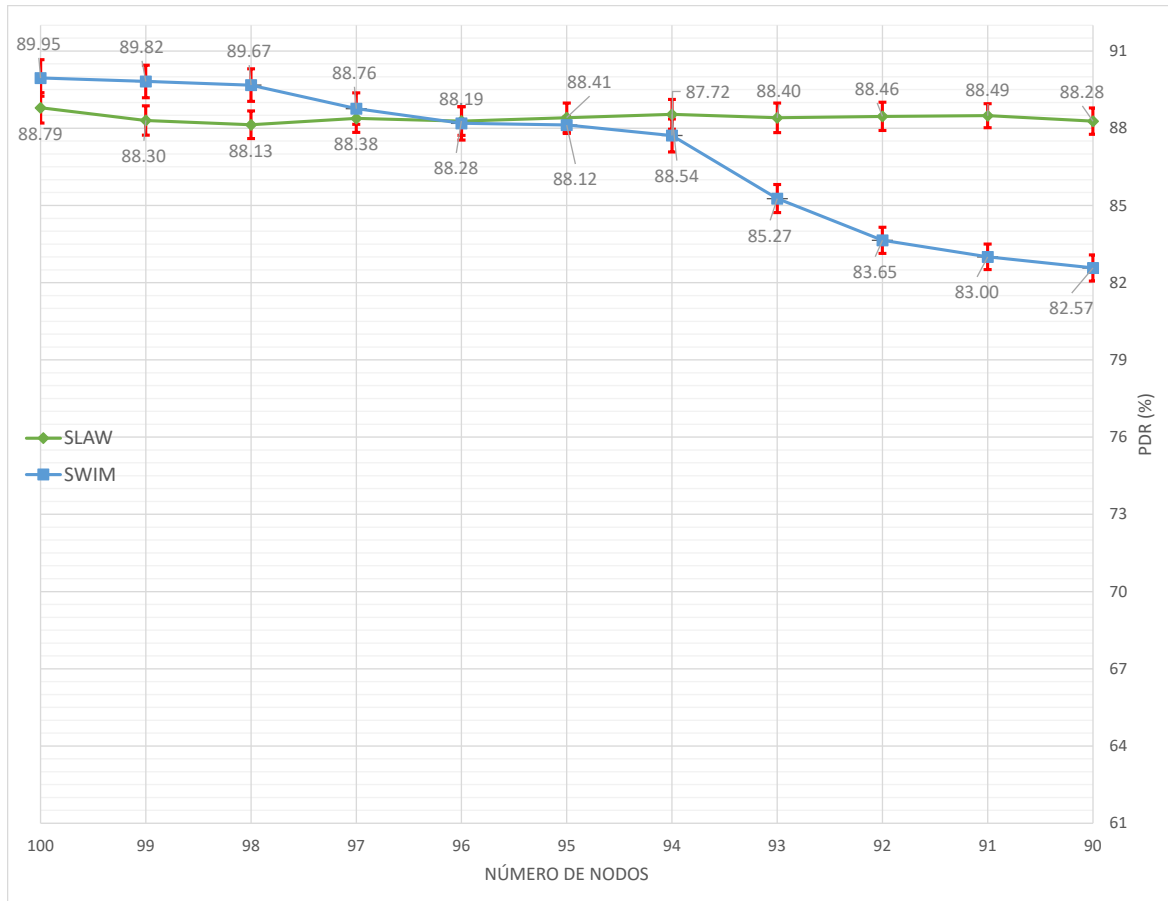


Figura 5.16: Resultados de **PDR** (%) en relación con el número de nodos en la red. Las distribuciones de **PDR** corresponden a los modelos **SLAW** y **SWIM**, tomando la métrica de grado para el análisis.

Al comparar las distribuciones de **PDR** entre los modelos **SLAW** y **SWIM**, se observa en la Tabla 5.22, que el primero contiene un mayor valor promedio de **PDR** que el segundo. Además, considerando la varianza, **SLAW** es un modelo que no se ve fuertemente afectado por el desprendimiento de nodos, alcanzando una cifra casi insignificante de 0.072 respecto al modelo **SWIM**, que posee una cifra de 7.431. Estos valores de **PDR** promedio y varianza están relacionados con el valor de grado promedio de forma que, si el grado promedio de un modelo de movilidad es mayor que otro, mayor es el valor promedio de **PDR**, mientras que la varianza es menor. De esta manera, al comparar los valores obtenidos por los modelos **SLAW** y **SWIM**, se deduce que el primero es un modelo que produce topologías más robustas, esto debido a que contiene un mayor valor de grado promedio.

Métrica de grado	100	99	98	97	96	95	94	93	92	91	90	Prom. PDR	Var. PDR	Grado promedio
SLAW	88.89	88.3	88.13	88.38	88.28	88.41	87.72	88.4	88.46	88.49	88.28	88.34	0.072	11.79
SWIM	89.95	89.82	89.67	88.76	88.19	88.12	88.54	85.27	83.65	83	82.57	87.04	7.43	6.16

Tabla 5.22: Valores promedio y varianza obtenidos a partir de las distribuciones de **PDR**, descritas en la Figura 5.16.

5.2.2. Impacto de la métrica de Centralidad de Intermediación en las redes en Malla

En este apartado, se consideró el impacto de la métrica de centralidad de intermediación al desprender los nodos con la más alta centralidad en la red, usando los modelos de movilidad **SWIM** y restricciones geográficas para el análisis. En la Figura 5.17 se muestra la distribución de **PDR** sobre estos dos modelos mencionados. En esta figura, se observa que los modelos de movilidad **SWIM** y restricciones geográficas comienzan con un porcentaje de **PDR** por encima del 88 %, marcando una diferencia de **PDR** inferior al 1 % entre los mismos. Esta diferencia porcentual se mantiene incluso al desprender el 1 % de nodos de la red. Al desprender más del 1 % de nodos, el porcentaje de **PDR** disminuye en gran medida para ambos casos.

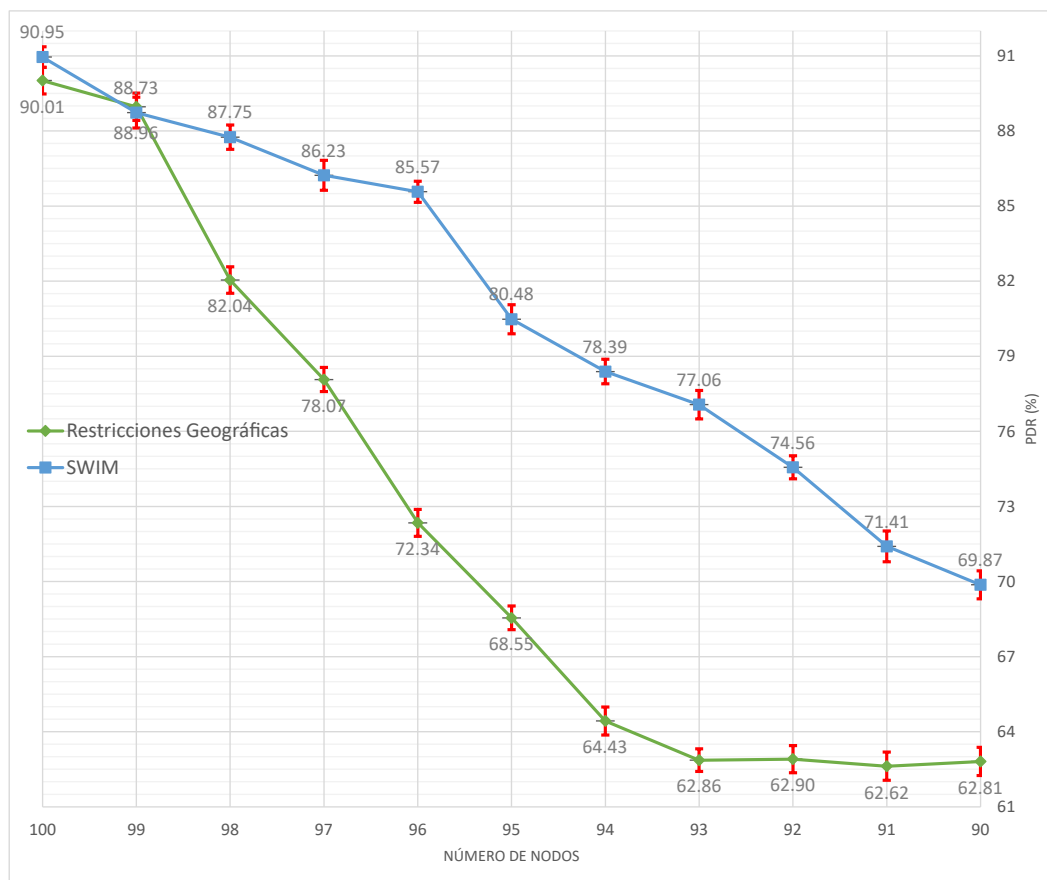


Figura 5.17: Resultados de **PDR** en relación con el número de nodos en la red. Las distribuciones de **PDR** corresponden a los modelos **SWIM** y restricciones geográficas, tomando la métrica de centralidad de intermediación para el análisis.

Restricciones geográficas resulta ser el modelo que presenta un escenario más destructivo, decayendo a un 62.81 % de **PDR** cuando se desprenden el 10 % de los nodos, mientras que **SWIM** decrece hasta un 68.87 % de **PDR** bajo las mismas condiciones. La diferencia porcentual de **PDR** entre los modelos de movilidad, alcanzado el 10 % de nodos desprendidos de la red, es de 7.06 %. La diferencia porcentual más grande de **PDR** entre los modelos **SWIM** y restricciones geográficas ocurre cuando se han desprendido un 7 % de nodos de la red, siendo esta diferencia del 14.2 %. La razón por la cual disminuye la diferencia porcentual entre ambos modelos, se debe a que al superar el 7 % de nodos desprendidos de la red, el **PDR** de restricciones geográficas tiende a mantener un valor sin una variación significativa, mientras que **SWIM** tiende a decaer en valor de **PDR**. Sin embargo,

al desprenderse el 10 % de nodos en la red, **SWIM** supera en porcentaje de **PDR** a restricciones geográficas. De esta manera, en la Figura 5.17, se observa que **SWIM** produce topologías más robustas que restricciones geográficas.

Por su parte, la Tabla 5.23, presenta los valores estadísticos, como el promedio y la varianza, de las distribuciones de **PDR**, las cuales se generaron a partir de los datos de la Figura 5.17. En esta tabla se observa que **SWIM** contiene mayor valor promedio de **PDR** que restricciones geográficas. Además, **SWIM** posee una varianza mucho menor que restricciones geográficas, marcando una diferencia del 6.31 %. De esta manera, en términos de robustez de red, **SWIM** genera topologías de red más robustas que el modelo de restricciones geográficas.

Métrica de cercanía	100	99	98	97	96	95	94	93	92	91	90	Prom. PDR	Var. PDR	Intermediación promedio
SWIM	90.95	88.73	87.75	86.23	85.57	80.48	78.39	77.06	74.56	71.41	69.87	81	21.08	218.47
restricciones geográficas	90.01	88.96	82.04	78.07	72.34	68.55	64.43	62.86	62.9	62.62	62.81	72.32	27.39	163.65

Tabla 5.23: Valores promedio y varianza obtenidos a partir de las distribuciones de **PDR**, descritas en la Figura 5.17.

5.2.3. Impacto de la métrica de Centralidad de Cercanía en las redes en Malla

Por último, la tercera métrica utilizada en las evaluaciones de robustez es la de centralidad de cercanía. En la Figura 5.18 se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones con hasta el 10 % de nodos más centrales desprendidos de la red. En esta figura se observa que el modelo de movilidad restricciones geográficas presenta una distribución de **PDR** más bajo que el modelo **SWIM**. Al comparar las dos distribuciones de **PDR**, se observa que restricciones geográficas posee una mayor distribución que **SWIM**, hasta alcanzar un total del 5 % de nodos desprendidos de la red. Al desprender más del 5 % de nodos en la red se observa que **SWIM** posee una mayor distribución de **PDR** que restricciones geográficas. Si se comparan los valores promedio de centralidad de cercanía entre estos dos modelos de movilidad, se observa que restricciones geográficas contiene un mayor valor que **SWIM**. Sin embargo, este valor promedio no está relacionado de forma directa con las distribuciones de **PDR**, presentadas por este mismo modelo. De esta forma, al contrario con lo que ocurre con el análisis de robustez mediante las métricas de grado e intermediación, la centralidad de cercanía no establece una relación, directa o inversa, entre los resultados de cercanía promedio y las distribuciones de **PDR**.

Al comparar las distribuciones de **PDR**, de los dos modelos de movilidad de la Figura 5.18, se tiene que la diferencia porcentual en dicho valor llega a ser mayor cuando se alcanza el 9 % de nodos desprendidos de la red. Además, la distribución de **PDR** del modelo **SWIM** tiende a estabilizarse luego de desprendidos el 5 % de nodos, mientras que la distribución de restricciones geográficas tiende a estabilizarse a partir del 7 % de nodos desprendidos. Por último, considerando los valores de **PDR** tras desprender 10 % de los nodos, **SWIM** termina con un valor de 77.70 %, mientras restricciones geográficas termina con un valor de 69.08 %, indicando de esta forma que las topologías generadas por **SWIM** son más robustas que las de restricciones geográficas.

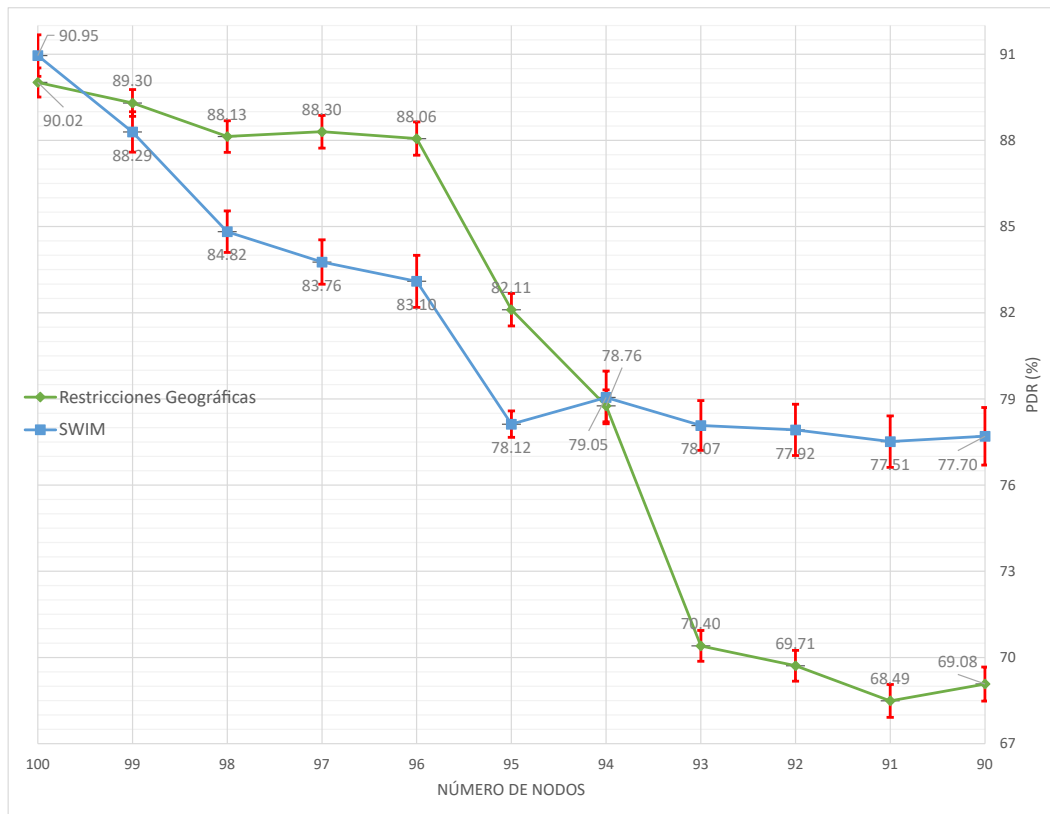


Figura 5.18: Resultados de PDR en relación con el número de nodos en la red. Las distribuciones de PDR corresponden a los modelos restricciones geográficas y SWIM, tomando la métrica de cercanía para el análisis.

En la Tabla 5.24, se ha considerado los valores promedio y varianza, respecto a las distribuciones de PDR de la Figura 5.18. Basado en dichos resultados, se puede observar que el promedio de la distribución de PDR del modelo restricciones, es menor que el de SWIM. Además, la varianza de restricciones geográficas es más alta que la de SWIM, marcando una diferencia de 8.09 %. De esta manera, al observar estos valores se infiere que el modelo SWIM genera topologías más robustas que el modelo restricciones geográficas.

Métrica de cercanía	100	99	98	97	96	95	94	93	92	91	90	Prom.	Var.	Cercanía promedio
restricciones geograficas	90.02	89.3	88.13	88.3	88.06	82.11	79.05	70.4	69.71	68.49	69.08	80.24	21.53	0.28
SWIM	90.95	88.29	84.82	84.76	83.1	78.12	78.76	78.07	77.92	77.51	77.7	81.82	13.44	0.2

Tabla 5.24: Valores promedio y varianza obtenidos a partir de las distribuciones de PDR, descritas en la Figura 5.17.

5.2.4. Impacto de la métrica de Excentricidad en las redes en Malla

Desde aquí en adelante la métrica de modularidad se la incluye como parte complementaria al análisis de las métricas de excentricidad, vector propio y coeficiente de agrupamiento. De esta manera, la combinación de la métrica de modularidad con cada una de las tres métricas mencionadas, permitió realizar un análisis sobre las mismas. A dicho análisis se lo denominó **cliente-servidor**. La métrica de modularidad no fue analizada de manera independiente debido a que dicha métrica no presenta valores individuales en los nodos dentro de la red.

Para el análisis del impacto de la métrica de excentricidad, se tomaron en consideración dos escenarios. En el primero se escogieron nodos de forma aleatoria, mientras que en el segundo se escogieron nodos con bajo

valor de excentricidad. En ambos casos, se escogieron dichos nodos para actuar como servidores. El objetivo fue medir la latencia con la cual fue entregada la información a los destinatarios. Los retardos fueron medidos en milisegundos (ms). Al final se estableció un promedio de todos los tiempos recogidos con el fin de realizar un análisis general de la red sobre la base de los datos obtenidos.

En la Figura 5.19 se observan dos gráficos de barras, los cuales representan los promedios de los retardos escogidos por los nodos de forma aleatoria y usando la métrica de excentricidad. Los gráficos de barras representan el retardo promedio de los modelos **SWIM** y restricciones geográficas, quienes a su vez mostraron el valor promedio más alto y más bajo en dicha métrica respectivamente. Al comparar los valores promedio de retardo del primer escenario, se observa que el modelo restricciones geográficas presenta menor retardo que **SWIM**. Por otro lado, al comparar los valores promedio de retardo en el segundo escenario, se observa que el modelo restricciones geográficas mantiene un valor promedio de retardo menor que **SWIM**. El hecho de que en ambos casos restricciones geográficas posea menor retardo promedio, se debe a que la métrica de excentricidad mide las distancias más largas entre los nodos. Entonces, al poseer menor valor promedio en la métrica de excentricidad, restricciones geográficas genera menores distancias que **SWIM**, obteniendo menor retardo en la transmisión de la información.

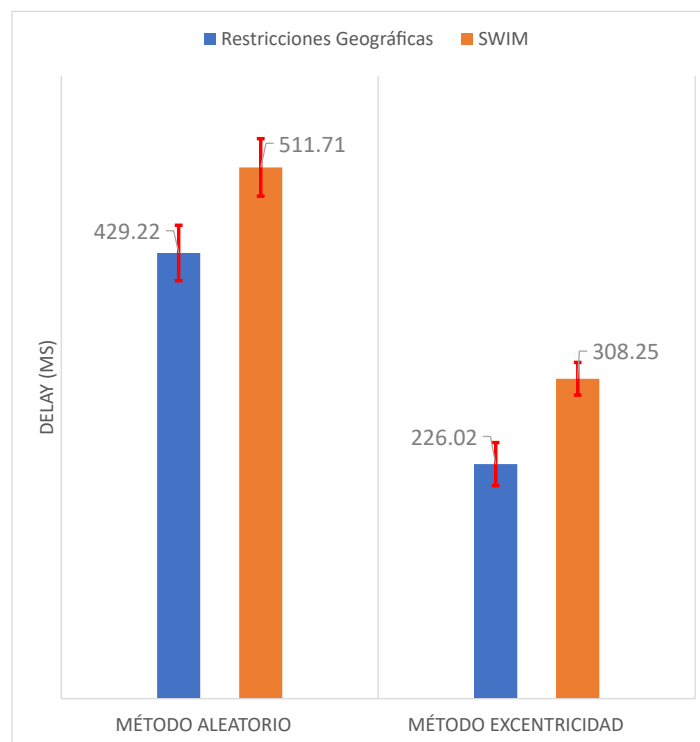


Figura 5.19: Resultados promedio de retardo en los modelos de movilidad restricciones geográficas y **SWIM**, bajo las pruebas de servidores proxy para el caso específico de la métrica de Excentricidad.

Al hacer uso de la métrica de excentricidad para el análisis de retardos, se observa una notoria disminución en dicho valor, cuando se compara con el método aleatorio. En la Tabla 5.25 se puede observar que al usar la métrica de excentricidad, el modelo restricciones geográficas reduce en un 47.34 % el retardo producido por la transferencia de información, mientras que en el modelo **SWIM** reduce el retardo en un 39.76 %. De esta manera se observa que el modelo que menor retardo produce en la transferencia de información resulta ser restricciones geográficas.

Métrica de excentricidad	Método aleatorio	Método con Excentricidad	Reducción de retardo (%)
Restricciones Geográficas	429.22	226.02	47.342
SWIM	511.71	308.25	39.761

Tabla 5.25: Valores promedio de los retardos obtenidos para los modelos restricciones geográficas y SWIM. En ambos casos se estableció un porcentaje de disminución de retardo.

5.2.5. Impacto de la métrica de vector propio en las redes en Malla

Al igual que con la métrica de excentricidad, el impacto de la métrica de vector propio fue analizada bajo el retardo promedio, obtenido a partir de los modelos SLAW y restricciones geográficas. A dichos modelos de movilidad les corresponde el valor promedio más alto y más bajo, en la métrica de excentricidad, respectivamente.

En la Figura 5.20 se observan los resultados de dos conjuntos de simulaciones, tomando en consideración un escenario aleatorio y un escenario en el que intervino la métrica de vector propio. En el escenario aleatorio se consideraron nodos al azar, los cuales funcionaron como servidores. De esta manera, el modelo SLAW alcanzó un retardo promedio de 86.56 ms, mientras que restricciones geográficas mantuvo un retardo muy próximo, alcanzando una cifra de 84.36 ms. En el escenario que consideró la métrica de vector propio, se puede notar una marcada diferencia en los retardos promedio obtenidos. El modelo SLAW alcanzó un retardo promedio de 22.11 ms, mientras restricciones geográficas alcanzó un retardo de 38.25 ms.

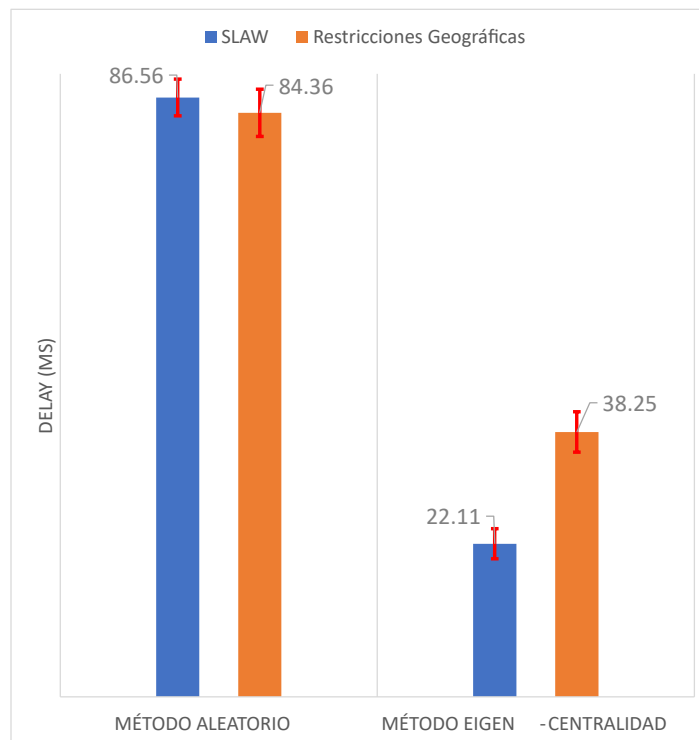


Figura 5.20: Resultados promedio de retardo en los modelos de movilidad SLAW y restricciones geográficas, bajo las pruebas de servidores proxy para el caso específico de la métrica de vector propio.

Al hacer uso de la métrica de vector propio para el análisis de retardos se observa, mediante la Tabla 5.26, que la disminución en los retardos es muy notoria. Para el caso del modelo SLAW, la reducción de retardos es del 74.46 %, mientras que para restricciones geográficas, la reducción del retardo es del 54.65 %. De esta

manera, el modelo **SLAW** es el que resulta en un menor retardo en la transmisión de la información, cuando se ve involucrada la métrica de vector propio para el análisis.

Métrica de vector propio	Método aleatorio	Método con vector propio	Reducción de retardo (%)
SLAW	86.56	22.11	74.45
Restricciones Geográficas	84.36	38.25	54.65

Tabla 5.26: Valores promedio de los retardos obtenidos para los modelos glsSLAW y restricciones geográficas. En ambos casos se estableció un porcentaje de disminución de retardo.

5.2.6. Impacto de la métrica de coeficiente de agrupamiento en las redes en Malla

Por último, dentro del análisis de todas las métricas, se evaluó el impacto del coeficiente de agrupamiento dentro de las **WMNs**. Esta métrica se analizó mediante el uso de **PDR**, en lugar del uso de retardos. La razón de hacer un análisis basado en **PDR** para esta métrica, se debe a que la misma involucra la cantidad de enlaces dentro de la red. La ruptura de enlaces importantes implicó una pérdida significativa en el **PDR** dentro de la red, tal como se demostró en el análisis basado en la métrica de grado (Sección 5.2.1). Basándose en estas premisas, se consideraron dos escenarios. El primero involucró el análisis de **PDR** escogiendo los nodos que actúan como servidores de forma aleatoria; mientras que el segundo escenario consideró la selección de servidores en base a la métrica de coeficiente de agrupamiento. Los análisis obtenidos de los dos escenarios mostraron que, al usarse la métrica de coeficiente de agrupamiento se tenía un mejor desempeño en la red, aumentando significativamente el **PDR** dentro de la misma.

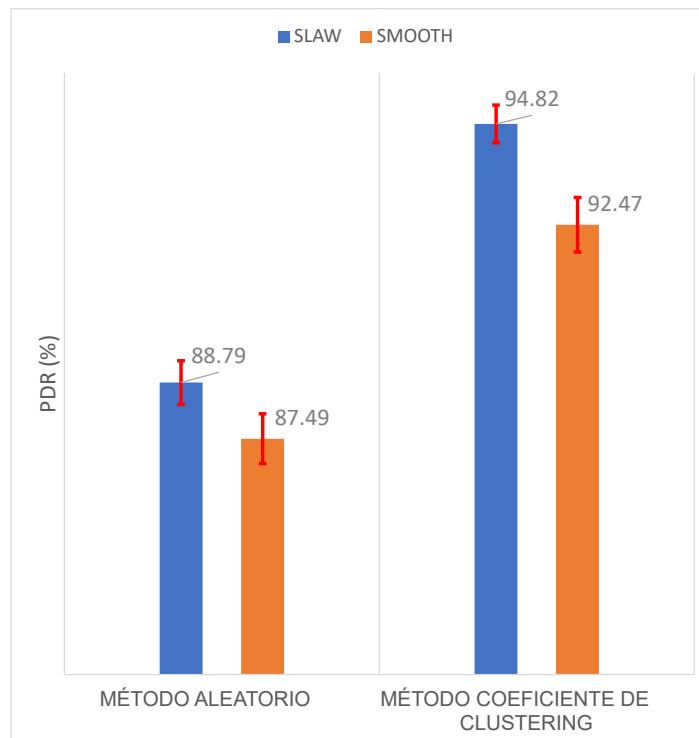


Figura 5.21: Resultados de **PDR** (%) en los modelos de movilidad **SLAW** y **SMOOTH** bajo las pruebas de servidores proxy, usando la métrica de Coeficiente de Agrupamiento como punto de análisis.

Para este análisis se consideró los modelos de movilidad **SLAW** y **SMOOTH**, que poseen el mayor y menor



valor promedio de coeficiente de agrupamiento respectivamente. En la Figura 5.21, se observan los resultados para los dos escenarios previamente descritos. En ambos casos, el modelo SLAW posee un mayor PDR que el modelo SMOOTH. Además, tomando los datos de PDR descritos por esta misma figura, se nota que el modelo SLAW crece significativamente más en su valor de PDR en comparación con el modelo SMOOTH. De forma concreta, mediante la Tabla 5.27, se nota un incremento de 6.03 % en el PDR por parte de SLAW, mientras que SMOOTH muestra un incremento de 4.98 %. Al observar que el modelo SLAW tiene mayor PDR que SMOOTH, en ambos casos, se infiere que el primer modelo genera grupos de nodos más densos que el segundo modelo. De esta manera, mientras mayor sea el valor promedio de coeficiente de agrupamiento presentado por un modelo de movilidad, mayor será el PDR dentro de la red.

Métrica coeficiente de agrupamiento	Método aleatorio	Método con Coeficiente de agrupamiento	Aumento de PDR (%)
SLAW	88.79	94.82	6.03
SMOOTH	87.49	92.47	4.98

Tabla 5.27: Valores de PDR obtenidos para los modelos SLAW y SMOOTH. En ambos casos se estableció un porcentaje de aumento en el PDR.



Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

El presente trabajo muestra un análisis comparativo de distintos modelos de movilidad realistas disponibles en la literatura a través de métricas de teoría de grafos. Posteriormente se evaluó el impacto que tienen las topologías de red resultantes de los distintos modelos de movilidad y sus métricas de teoría de grafos respectivas en la operación y rendimiento de las redes inalámbricas de malla. De los resultados obtenidos de la gran cantidad de simulaciones llevadas a cabo y expuestas en el Capítulo 5 se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los modelos de movilidad pueden ser evaluados a través de las métricas de teoría de grafos, de las cuales la Centralidad de Grado, Centralidad de Intermediación, Centralidad de Cercanía, Excentricidad, Coeficiente de Agrupamiento, Vector Propio y Modularidad se muestran idóneas para dar una idea más clara sobre las topologías generadas por cada modelo de movilidad, cuando éstos se aplican a las redes inalámbricas en malla. Por lo tanto, esto permite entender las características de cada modelo de movilidad y hace posible predecir su comportamiento bajo ciertas condiciones. Esta información resultó relevante para saber que nodos son esenciales dentro de la red. De esa manera, se consideraron aplicaciones como robustez de red, análisis de PDR y medición del retardo de la información entregada entre un cliente y servidor.
- La métrica de centralidad de grado mostró resultados marcados entre los modelos de movilidad realistas. Si bien las tendencias a incrementar el grado promedio, conforme aumentó el número de nodos en la red, resultaron similares en la mayor parte de modelos de movilidad, los valores promedio establecidos por cada modelo variaron considerablemente. El único modelo que presentó resultados fuera de la tendencia establecida por los modelos de movilidad, es el modelo área de desastre.
- En particular, el modelo de movilidad SLAW presentó los resultados más destacables en las métricas de Centralidad de Grado y de Vector Propio, por lo cual se llega a la conclusión de que SLAW es un modelo que destaca por generar un mayor número de enlaces en la red, respecto al resto de modelos de movilidad. Por otra parte, se encontró que este modelo también tiende a formar una menor cantidad de comunidades en comparación con los otros modelos de movilidad analizados. Es decir, los nodos se distribuyen de una manera más uniforme sobre toda el área de simulación. Aunque, también es el modelo de movilidad con alto coeficiente de agrupamiento promedio, ese valor en promedio es muy cercano al modelo de movilidad

de Restricciones Geográficas.

- Por su parte, el modelo de movilidad SWIM presentó las siguientes tres características fundamentales que lo definen:
 - En la centralidad de grado, SWIM tiende a formar menos conexiones que los otros modelos de movilidad.
 - En la centralidad de intermediación, SWIM presentó los resultados más altos de esta métrica de grafos, en comparación con el resto de modelos de movilidad.
 - El modelo de movilidad SWIM muestra una correlación entre las métricas de grado e intermediación con la métrica de excentricidad. Esta correlación se evidencia debido a que mediante la teoría, puesto que esta explica que la excentricidad es la medida de las distancias más largas entre los nodos. Al poseer SWIM el mayor valor en la métrica de grado e intermediación, es necesario que dicho modelo también posea un valor promedio alto en la métrica de excentricidad.
- El modelo de movilidad SMOOTH resultó ser el modelo más equilibrado de entre todos los otros modelos. Aunque tiene bajos valores de las métricas de Centralidad de Vector Propio, Coeficiente de Agrupamiento y de Cercanía, sus valores bajos son muy cercanos a las otras métricas por lo que no destaca tanto como SWIM o SLAW. Es ese equilibrio y un valor uniforme en todas las métricas lo que caracteriza a este modelo de movilidad.
- El modelo de movilidad de Área de Desastre es el que presentó las diferencias más notables de entre los seis modelos de movilidad realistas analizados. Estos resultados son los más esperados puesto a que el modelo es orientado a un caso especial de aplicación de las WMNs; en el que la comunicación se vuelve muy difícil para todos los nodos en la red. Con respecto a los otros modelos de movilidad, se puede apreciar que:
 - En este modelo de movilidad se obtiene un alto valor de número de comunidades. Sin embargo esto se debe principalmente a que se generan muchos nodos aislados y cada uno es interpretado como una comunidad independiente.
 - En consecuencia, también se tiene un bajo valor de centralidad de grado por los pocos nodos que están conectados entre sí.
 - Bajo estas condiciones es muy baja la centralidad de intermediación en la red.
 - La centralidad de cercanía es más alta en el modelo de Área de Desastre debido a que los pocos nodos conectados se encuentran muy unidos en cada una de las zonas de desastre respectivas.
 - Finalmente para este modelo, la excentricidad resulta muy baja porque esta métrica analiza las distancias del camino más corto en las redes conectadas.
- El modelo de movilidad de Restricciones Geográficas presenta particularidades bastante destacables en las métricas de Centralidad de Cercanía y Comunidades. En el caso de comunidades, la geografía de una ciudad y el comportamiento humano hace que sea más fácil generar diferentes comunidades. Inclusive, si se consideran los parques, plazas, centros comerciales, áreas verdes, cafeterías y demás áreas sociales que conforman a una ciudad, entonces se tendría una mayor cantidad de comunidades. Es importante recalcar que, con tan solo incluir las restricciones de las vías de una ciudad se obtuvo una mayor cantidad de comunidades; lo cual demuestra que, mientras más variables realistas se agreguen al modelo de movilidad, entonces se obtendrían redes y grafos con una clara estructura de comunidades. Por otra parte, considerando la métrica de centralidad de cercanía, el modelo de movilidad restricciones geográficas presenta el mayor valor promedio. Esto se debe a que este modelo de movilidad limita el desplazamiento de los nodos debido a los obstáculos que se presentan dentro del área de simulación.

Entonces, la concentración de nodos en ciertas zonas resulta más fuerte para este modelo, en comparación con el resto de modelos.

- El desprendimiento de nodos (Sección 5.2), usando los valores más altos de cada métrica de teoría de grafos, representó un impacto considerable únicamente sobre las métricas de grado, intermediación y cercanía. Estas tres métricas presentaron una decadencia en la distribución de PDR, conforme se desprendieron nodos de la red. Dentro del análisis usando estas tres métricas, se observó un cambio de PDR de un valor de 90 (aprox.) hasta un valor de 62 en el peor de los casos, siendo 90 el valor de PDR sin realizar ningún desprendimiento de nodos. De esta manera, se puede observar como afecta el desprendimiento de nodos al PDR dentro de la red. Por otra parte, este mismo análisis de PDR no pudo ser aplicado a las métricas de excentricidad, vector propio y coeficiente de agrupamiento. Esto fue debido a que el desprendimiento de nodos, bajo los conceptos de estas tres últimas métricas, no generaron una decadencia en la distribución de PDR.
- Los escenarios más destructivos, al analizar las métricas de grado, intermediación y cercanía, sucedieron sobre las dos últimas métricas. Sobre las métricas de intermediación y cercanía, el PDR llegó a decaer por debajo del 70 % en los casos más críticos. Por otro lado, en el caso de la métrica de grado, los escenarios no resultaron fuertemente afectados. Esto se debe a que el PDR llegó a valores de decadencia que no estuvieron por debajo del 82 % en el peor de los casos. La razón por la cual no se tuvo un fuerte impacto en la métrica de grado, se debe a que los modelos de movilidad SWIM y SLAW concentran sus nodos, en gran medida, en espacios no muy alejados [20, 22, 56]. Entonces, al generar espacios de trabajo con la mayoría de nodos centrados en un mismo punto, el impacto de la metodología de robustez sobre la métrica de grado no es muy efectiva.
- De entre todos los resultados de las pruebas de Robustez se encontró que la métrica de centralidad de intermediación es la más crítica. Además, se descubrió que los modelos con mayor valor promedio de centralidad de intermediación tienden a soportar de mejor manera los ataques a su topología de red, esto porque existe una mayor cantidad de nodos más relevantes en la red. En la métrica de centralidad de cercanía los resultados fueron bastante complejos de analizar debido a que, cuando la red se fragmenta su comportamiento varía drásticamente después del 5 % de nodos desprendidos de la red. Esto a su vez se debe a la propia naturaleza de la métrica que se puede verificar en la Ecuación 2.4, por lo que un nodo desprendido, afecta fuertemente en la red. Por último, en el caso de la métrica de centralidad de grado, los resultados obtenidos demuestran que la métrica también se ve afectada por el desprendimiento de nodos, pero la PDR en la red no se ve afectado tan drásticamente como en los casos anteriores. Por tal razón, se demostró que los modelos de movilidad con más centralidad de grado resultan sufrir menos a los ataques de robustez en su red.
- En un principio, se intentó realizar un análisis sobre las métricas de excentricidad, vector propio y coeficiente de agrupamiento sin considerar la división de comunidades mediante la métrica de modularidad. Los grafos analizados mostraron una gran concentración de nodos, con alto valor de excentricidad, vector propio y coeficiente de agrupamiento, únicamente en ciertas partes del área de simulación. Entonces, para evitar resultados similares a los de las Figuras A.3, A.4, y A.5, se optó por utilizar la información de la estructura de comunidades. De esta manera, la evaluación y sus resultados tuvieron una mayor validez.
- Las métricas de excentricidad, vector propio y coeficiente de agrupamiento, se analizaron mediante otra metodología que permitió dar un enfoque más claro del impacto de dichas métricas dentro de la red. El impacto se midió mediante el análisis de retardo y PDR para una aplicación de ubicación de cluster de servidores. A través de las Figuras 5.19 y 5.20, se observa una disminución en el retardo para la entrega

de la información. Esta disminución en el retardo se consideró como una mejora para la comunicación entre los clientes y el servidor. Esta mejora ocurre debido a que se toma en consideración las métricas de excentricidad y vector propio para reducir los retardos de la información entregada. Por otra parte, al observar la Figura 5.21, se nota un incremento en el PDR dentro de la red. Este incremento se debe a que, asimismo, se consideraron valores altos del coeficiente de agrupamiento. Por lo tanto, al considerar estas mejoras, tanto en el retardo como en la PDR, se indica que el impacto de estas métricas de teoría de grafos resulta ser influyente dentro de las redes inalámbricas de malla.

- Dentro de la evaluación presentada en la Sección 5.2, no se consideró de forma explícita a la métrica de modularidad. Esta métrica sirvió de apoyo para obtener resultados sobre las métricas de excentricidad, vector propio y coeficiente de agrupamiento. Gracias a la métrica de modularidad, se crearon comunidades dentro de la red, lo que permitió realizar un análisis más profundo que tomando únicamente toda la red como una sola comunidad. Los resultados obtenidos para las métricas de excentricidad, vector propio y coeficiente de agrupamiento, tuvieron un mejor desempeño cuando se les aplicó esta segunda metodología.

6.2. Trabajos futuros

De los resultados obtenidos en la Sección 5.2 se logró apreciar que conociendo de mejor manera las métricas de grafos, estas pueden ser aplicadas combinándolas unas con otras para expandir aún más el campo de aplicación de las métricas en redes de telecomunicaciones y más específicamente en redes en malla tanto móviles como en redes fijas. Uno de esos ejemplos se ha utilizado en la Sección 5.2.5 donde se realiza una combinación entre la métrica de grafos de centralidad de vector propio y las comunidades resultantes de la métrica de modularidad. Combinación que fue realizada para una aplicación de optimización en la ubicación de servidores proxy o caché con el objetivo de brindar un mejor servicio al usuario, de tal manera que se redujo los tiempos de retardo extremo-extremo.

Las aplicaciones utilizadas en la Sección 5.2 fueron únicamente para comprobar el impacto de las métricas en las redes en malla; sin embargo, se podría hacer una investigación más exhaustiva de dichas aplicaciones. Como por ejemplo, contrastar la aplicación de los servidores proxy mediante la combinación de la métrica de centralidad de vector propio con otras combinaciones como la de comunidades con centralidad de intermediación, y realizando pruebas de tráfico multimedia sobre la red. Además, se podría implementar una combinación de excentricidad con comunidades y realizar las mismas pruebas de tráfico de red, para al final verificar qué combinación presenta mejores resultados en términos de retardos, PDR y tasa efectiva.

A futuro se podría realizar adicionalmente una aplicación de control de topología para WMNs basado en las métricas de vector propio y comunidades, dado que los resultados de esta métrica de vector propio que se obtuvieron en la Sección 5.2.5 son muy prometedores, y dan la idea de que se podría realizar muchos proyectos adicionales en torno a esta métrica.

Finalmente otros estudios pueden explorar nuevas aplicaciones y fuentes de optimización de redes en general, en base a las distintas métricas de teoría de grafos o cualquier combinación de éstas. Muchas de estas posibles aplicaciones se pueden explorar en el nuevo paradigma de comunicaciones móviles de quinta generación, sobre todo en las comunicaciones de dispositivo a dispositivo (D2D) o en las comunicaciones tipo máquina (MTC).

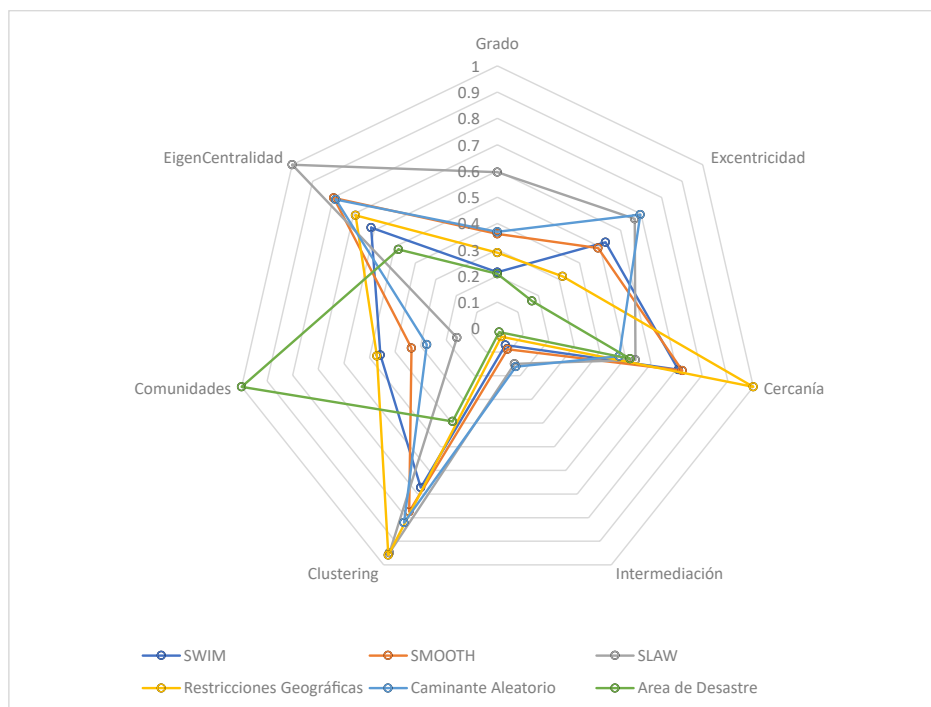


Figura A.1: Gráfico de resumen donde se muestran los resultados de los modelos de movilidad, comparados usando las distintas métricas de teoría de grafos establecidas. Este gráfico se obtuvo de las simulaciones donde participaron 50 nodos.

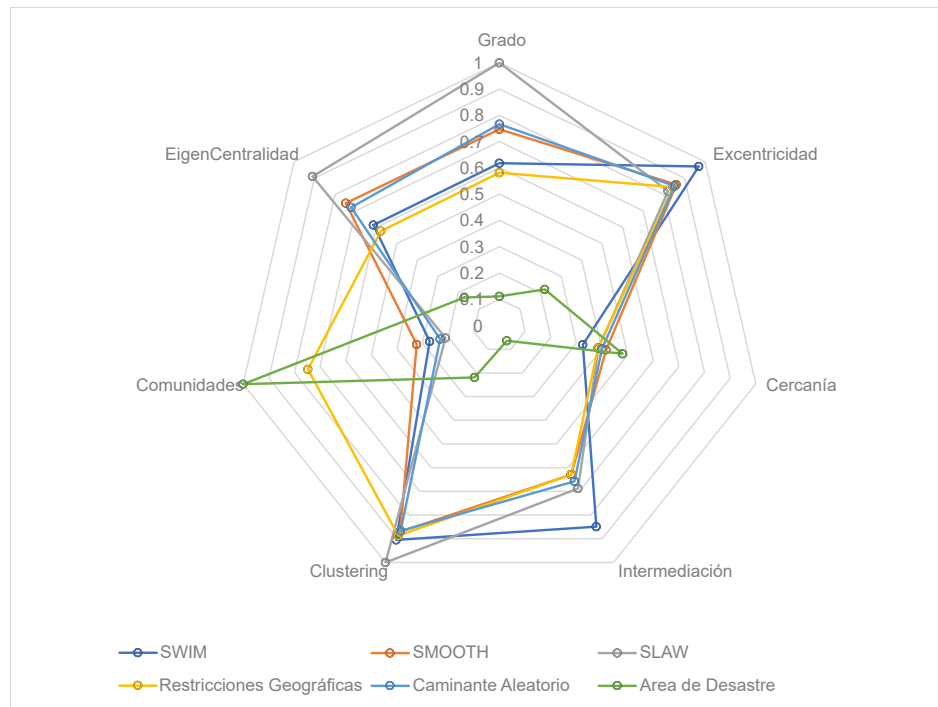


Figura A.2: Gráfico de resumen donde se muestran los resultados de los modelos de movilidad, comparados usando las distintas métricas de teoría de grafos establecidas. Este gráfico se obtuvo de las simulaciones donde participaron 150 nodos.

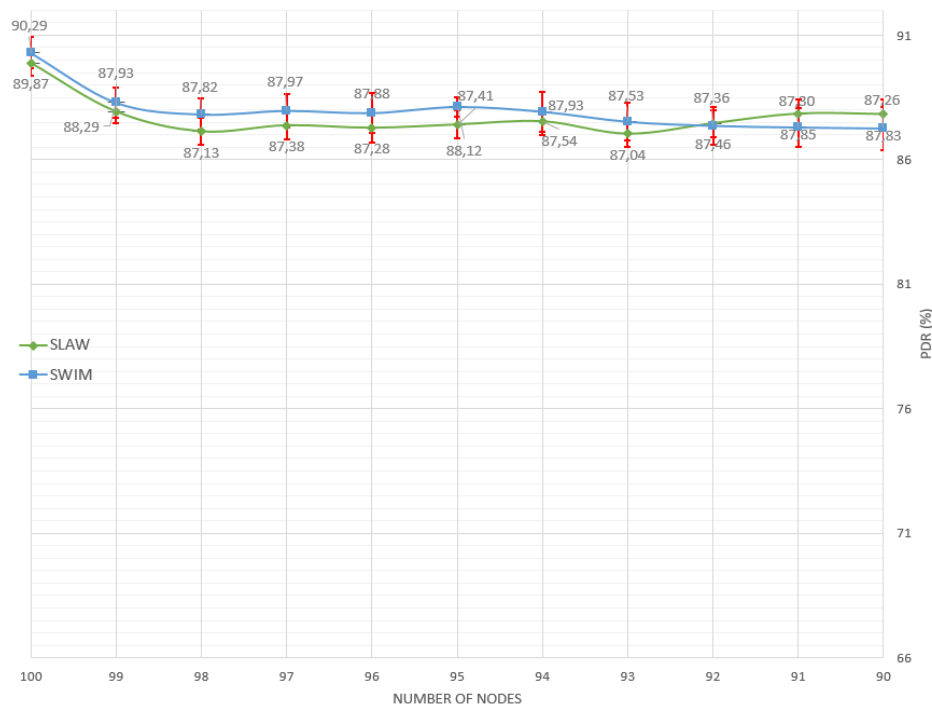


Figura A.3: Resultados de Packet Delivery Ratio (%) vs Número de nodos en las pruebas de robustez para la métrica de Eigen-Centralidad.

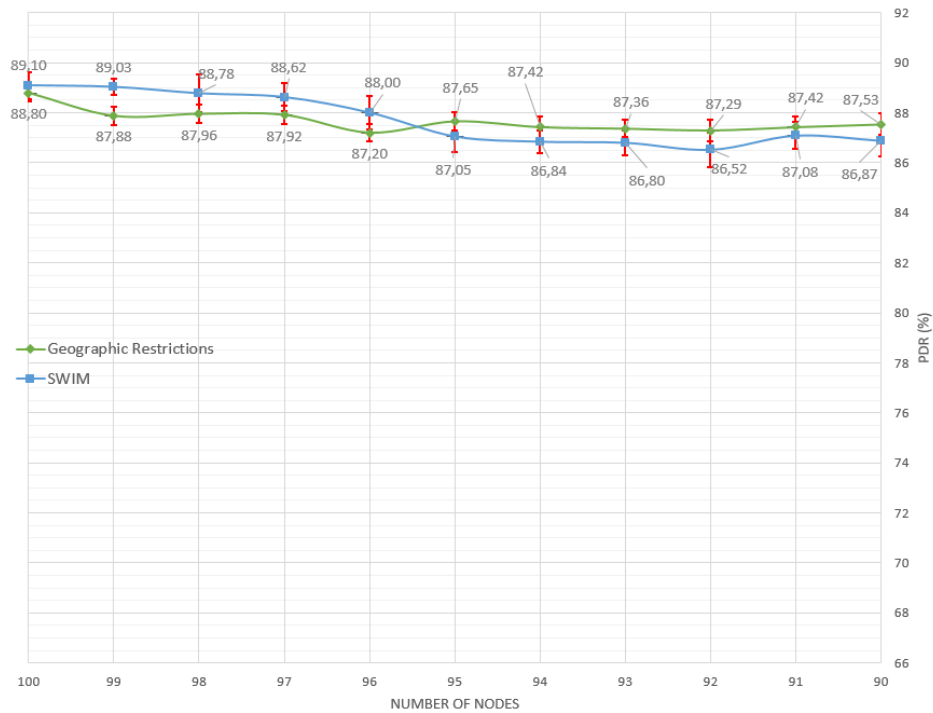


Figura A.4: Resultados de Packet Delivery Ratio (%) vs Número de nodos en las pruebas de robustez para la métrica de Excentricidad.

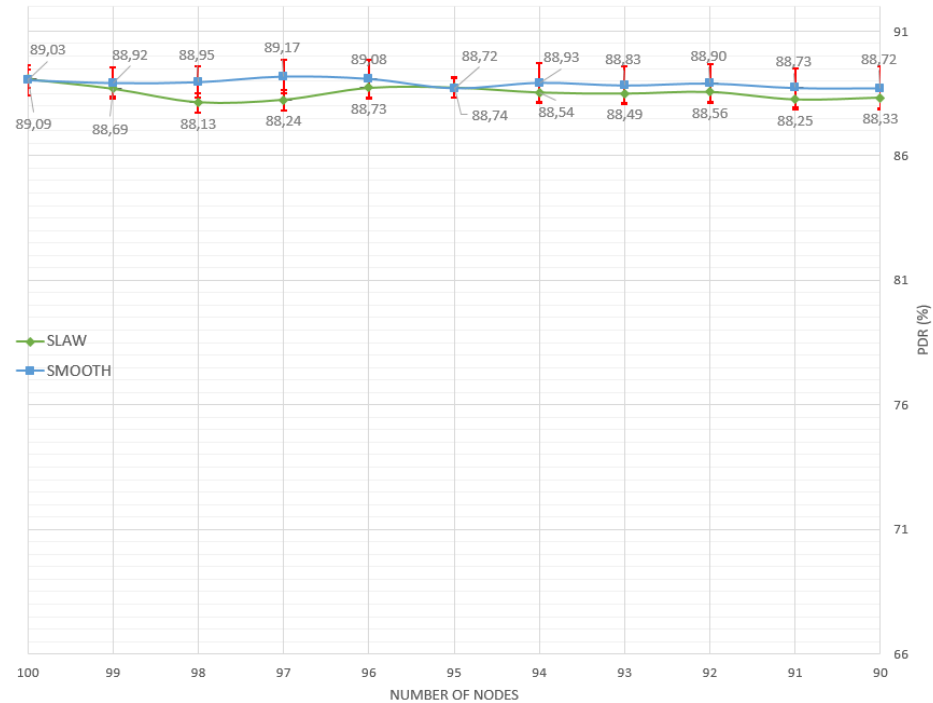


Figura A.5: Resultados de Packet Delivery Ratio (%) vs Número de nodos en las pruebas de robustez para la métrica de Coeficiente de Clustering.



Algoritmos

B.1. Código para la obtención de las matrices de adyacencia y costes

```
1 #include <iostream>
2 #include <fstream>
3 #include <sstream>
4 //#include </usr/include/libgexf/libgexf.h>
5 #include <libgexf/libgexf.h>
6
7 //#include <chrono>
8
9 #include "ns3/core-module.h"
10 #include "ns3/mobility-module.h"
11 #include "ns3/ns2-mobility-helper.h"
12 #include "ns3/netanim-module.h"
13
14 #include <stdlib.h>
15
16 //ADDED BY ANDRES END
17
18 //#include "ns3/core-module.h"
19 #include "ns3/internet-module.h"
20 #include "ns3/network-module.h"
21 #include "ns3/applications-module.h"
22 #include "ns3/wifi-module.h"
23 #include "ns3/mesh-module.h"
24 #include "ns3/mesh-helper.h"
25 #include "ns3/netanim-module.h" //AVR
```



```
26 #include "ns3/flow-monitor-helper.h" //AVR
27 //include "ns3/ns2-mobility-helper.h" //AVR to call CM mobility model
28 //include "ns3/config-store-module.h" //juandi energia
29 //include "ns3/energy-module.h" //juandi energia
30
31 //ADDED BY FABIAN ASTUDILLO BEGIN
32 #include "ns3/mesh-point-device.h"
33 #include "ns3/peer-management-protocol.h"
34 #include "ns3/peer-link.h"
35 #include "ns3/nstime.h"
36 #include <Snap.h>
37 //ADDED BY FABIAN ASTUDILLO END
38
39 using namespace ns3;
40
41 using namespace dot11s;
42
43 NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("MeshSim");
44
45 namespace patch
46 {
47     template < typename T > std::string to_string( const T& n )
48     {
49         std::ostringstream stm ;
50         stm << n ;
51         return stm.str() ;
52     }
53 }
54
55 class MeshTest
56 {
57 public:
58     /// Init test
59     MeshTest ();
60     ~MeshTest ();
61     /// Configure test from command line arguments
62     int Configure (int argc, char ** argv);
63     /// Run test
64     int Run ();
65
66 private:
67     bool b_pajek=false;
68     uint32_t m_samples;
```



```
69  int    m_xSize;
70  int    m_ySize;
71  double m_step;
72  double m_randomStart;
73  double m_totalTime;
74  double m_packetInterval;
75  uint16_t m_packetSize;
76  uint32_t m_nIfaces;
77  bool    m_chan;
78  bool    m_pcap;
79  std::string m_stack;
80  std::string m_root;
81
82  //ADDED BY ANDRES BEGIN
83  uint32_t m_maxPacketCount;
84  int m_runN;
85  uint32_t nodeNum;
86  double duration;
87  std::string traceFile;
88  std::string pajekFilename;
89  std::string outFolder;
90  int reportCount;
91  double m_steptime;
92
93  std::map<Mac48Address, uint32_t> nodesTable;
94
95  std::map<uint32_t, uint32_t*> TableMetrics;
96
97  uint32_t* matrixMetrics;
98
99  /// List of network nodes
100 NodeContainer nodes;
101 /// List of all mesh point devices
102 NetDeviceContainer meshDevices;
103 //Addresses of interfaces:
104 Ipv4InterfaceContainer interfaces;
105 // MeshHelper. Report is not static methods
106 MeshHelper mesh;
107
108 std::ofstream logfileNodes;
109
110 typedef PUNGraph PGraph; // undirected graph
111
```




```
112 private:
113     /// Create nodes and setup their mobility
114     void CreateNodes ();
115     /// Install internet m_stack on nodes
116     void InstallInternetStack ();
117     /// Install applications
118     void InstallApplication ();
119     /// Print mesh devices diagnostics
120     void Report ();
121
122     void TestNode(uint32_t node);
123
124     void ReportPos ();
125 };
126
127 MeshTest::MeshTest () :    //Avr
128     b_pajek(false),
129     m_samples(0),
130     m_xSize (10),
131     m_ySize (10),
132     m_step (100.0),
133     m_randomStart (0.5), //Avr
134     m_totalTime (50),
135     m_packetInterval (0.02),
136     m_packetSize (512),
137     m_nIfaces (1),
138     m_chan (true),
139     m_pcap (false), // create wireshark reports
140     m_stack ("ns3::Dot1sStack"),
141     m_root ("ff:ff:ff:ff:ff:ff"), //Avr
142     m_maxPacketCount (10000),
143     m_runN (10),
144     nodeNum (100),
145     duration (20),
146     reportCount (0),
147     m_steptime(5.0),
148     matrixMetrics(NULL)
149 {
150
151 }
152
153 MeshTest::~MeshTest()
154 {
```

```
155 free(matrixMetrics);
156 for (std::map<uint32_t, uint32_t*>::iterator it = TableMetrics.begin() ; it != TableMetrics.end(); ++it)
157 {
158     free(it->second);
159 }
160 TableMetrics.clear();
161 }
162
163 //*****
164 //      MeshTest::Configure
165 //*****
166 int
167 MeshTest::Configure (int argc, char *argv[])
168 {
169     b_pajek = false;
170     pajekFilename = "";
171     CommandLine cmd;
172
173     cmd.AddValue ("x-size", "Number of nodes in a row grid. [6]", m_xSize);
174     cmd.AddValue ("y-size", "Number of rows in a grid. [6]", m_ySize);
175     cmd.AddValue ("step", "Size of edge in our grid, meters. [100 m]", m_step);
176     cmd.AddValue ("start", "Maximum random start delay, seconds. [0.1 s]", m_randomStart);
177     cmd.AddValue ("time", "Simulation time, seconds [500 s]", m_totalTime);
178     cmd.AddValue ("packet-interval", "Interval between packets in UDP ping, seconds [0.001 s]",
179         m_packetInterval);
179     cmd.AddValue ("packet-size", "Size of packets in UDP ping", m_packetSize);
180     cmd.AddValue ("interfaces", "Number of radio interfaces used by each mesh point. [1]", m_nIfaces);
181     cmd.AddValue ("channels", "Use different frequency channels for different interfaces. [0]", m_chan);
182     cmd.AddValue ("pcap", "Enable PCAP traces on interfaces. [0]", m_pcap);
183     cmd.AddValue ("stack", "Type of protocol stack. ns3::Dot11sStack by default", m_stack);
184     cmd.AddValue ("root", "Mac address of root mesh point in HWMP", m_root);
185     cmd.AddValue ("maxPacketCount", "Maximum TX packets", m_maxPacketCount);
186     cmd.AddValue ("runN", "Number of run execution of the scenario", m_runN);
187     cmd.AddValue ("nodeNum", "Number of nodes", nodeNum);
188     cmd.AddValue ("duration", "Duration of Simulation", duration);
189     cmd.AddValue ("traceFile", "Ns2 movement trace file", traceFile);
190     cmd.AddValue ("outFolder", "Output folder for simulation results", outFolder);
191     cmd.AddValue ("reportCount", "Report Count", reportCount);
192     cmd.AddValue ("pajek", "Report Count", pajekFilename);
193
194     cmd.AddValue ("stepTime", "Step of the time (5 seconds by default)", m_stepTime);
195
196     cmd.Parse (argc, argv);
```



```
197
198 if (pajekFilename.length() > 0)
199 {
200     NS_LOG_INFO("PAJEK file will be generated");
201     b_pajek = true;
202 }
203
204 std::cout << "Num of Nodes:" << nodeNum << std::endl;
205
206 NS_LOG_DEBUG ("Grid:" << m_xSize << "*" << m_ySize);
207 NS_LOG_DEBUG ("Simulation time: " << m_totalTime << " s");
208 std::cout << "Simulation time: " << m_totalTime << " s" << std::endl;
209
210 // Check command line arguments
211 if (traceFile.empty () || nodeNum <= 0 || duration <= 0 || outFolder.empty())
212 {
213     std::cout << "Usage of " << argv[0] << " :\n\n"
214         ".\waf --run \"ns2-mobility-trace\"
215         \" --traceFile=src/mobility/examples/default.ns_movements\"
216         \" --nodeNum=2 --duration=100.0\" \n\n"
217         \" --outFolder=~/resultsns3\"
218         "NOTE: ns2-traces-file could be an absolute or relative path. You could use the file default.
219         ns_movements\n"
220         "    included in the same directory of this example file.\n\n"
221         "NOTE 2: Number of nodes present in the trace file must match with the command line argument and
222         must\n"
223         "    be a positive number. Note that you must know it before to be able to load it.\n\n"
224         "NOTE 3: Duration must be a positive number. Note that you must know it before to be able to load it.\n\n"
225         n";
226
227     return -1;
228 }
229
230 matrixMetrics = (uint32_t*)malloc(nodeNum*nodeNum*sizeof(uint32_t));
231
232 memset(matrixMetrics, 0x00, nodeNum*nodeNum*sizeof(uint32_t));
233
234 return EXIT_SUCCESS;
235 }
236
237 //*****
238 //      MeshTest::CreateNodes
239 //*****
240
```



```
237 void
238 MeshTest::CreateNodes ()
239 {
240     Ns2MobilityHelper ns2 = Ns2MobilityHelper (traceFile);
241
242     // Create all nodes.
243     nodes.Create (nodeNum);
244
245     ns2.Install (); // configure movements for each node, while reading trace file
246
247     // Configure YansWifiChannel
248     YansWifiPhyHelper wifiPhy = YansWifiPhyHelper::Default ();
249     YansWifiChannelHelper wifiChannel = YansWifiChannelHelper::Default ();
250     wifiPhy.SetChannel (wifiChannel.Create ());
251
252     mesh = MeshHelper::Default ();
253
254     if (!Mac48Address (m_root.c_str ()).IsBroadcast ())
255     {
256         mesh.SetStackInstaller (m_stack, "Root", Mac48AddressValue (Mac48Address (m_root.c_str ())));
257     }
258     else
259     {
260         mesh.SetStackInstaller (m_stack);
261     }
262     if (m_chan)
263     {
264         mesh.SetSpreadInterfaceChannels (MeshHelper::SPREAD_CHANNELS);
265     }
266     else
267     {
268         mesh.SetSpreadInterfaceChannels (MeshHelper::ZERO_CHANNEL);
269     }
270     mesh.SetMacType ("RandomStart", TimeValue (Seconds (m_randomStart)));
271     // Set number of interfaces – default is single-interface mesh point
272     mesh.SetNumberOfInterfaces (m_nIfaces);
273     // Install protocols and return container if MeshPointDevices
274     meshDevices = mesh.Install (wifiPhy, nodes);
275
276     for (NetDeviceContainer::Iterator i = meshDevices.Begin (); i != meshDevices.End (); ++i)
277     {
278         uint32_t nodeId = (*i)->GetNode ()->GetId ();
279         //graph.addNode(patch::to_string(nodeId));
```



```
280 Ptr<MeshPointDevice> mp = (*i)->GetObject<MeshPointDevice> ();
281 Mac48Address address = Mac48Address::ConvertFrom (mp->GetAddress());
282 nodesTable[address] = nodeId;
283 }
284
285 if (m_pcap)
286     wifiPhy.EnablePcapAll (std::string ("mp-"));
287 }
288
289 //*****
290 //      MeshTest::InstallInternetStack
291 //*****
292 void
293 MeshTest::InstallInternetStack ()
294 {
295     InternetStackHelper internetStack;
296     internetStack.Install (nodes);
297     Ipv4AddressHelper address;
298     address.SetBase ("10.1.1.0", "255.255.255.0");
299     interfaces = address.Assign (meshDevices);
300 }
301 //*****
302 //      MeshTest::InstallApplication
303 //*****
304 void
305 MeshTest::InstallApplication ()
306 {
307 }
308 //*****
309 //      MeshTest::Run()
310 //*****
311 int
312 MeshTest::Run ()
313 {
314     CreateNodes ();
315     InstallInternetStack ();
316     InstallApplication (); //AVR
317
318     //      SIMULATION TIME
319
320     uint32_t logNode = 1;
321     std::ostream os;
322     os << outFolder << "/logNodo_" << logNode << ".data";
```

```
323
324 logfileNodes.open (os.str ().c_str ());
325
326 Simulator::Schedule (Seconds(m_steptime), &MeshTest::Report, this);
327
328 Simulator::Stop (Seconds (m_totalTime)); //fijo el tiempo en el que debe detenerse
329
330 Simulator::Run ();
331
332
333 logfileNodes.close();
334
335 Simulator::Destroy ();
336 return 0;
337 }
338
339 //*****
340 //      MeshTest::Report
341 //*****
342
343 void
344 MeshTest::TestNode (uint32_t nodeNum)
345 {
346     Simulator::Schedule (Seconds(1), &MeshTest::TestNode, this, nodeNum);
347     Ptr<Node> nodePt = nodes.Get(nodeNum);
348     Ptr<MeshPointDevice> mpd = DynamicCast<MeshPointDevice>(nodePt->GetDevice(0));
349     // To access, we need the underlying WifiNetDevices
350     std::vector<Ptr<NetDevice> > ifaces = mpd->GetInterfaces ();
351     Ptr<MeshWifiInterfaceMac> macMWIM;
352     for (std::vector<Ptr<NetDevice> >::iterator i = ifaces.begin (); i != ifaces.end (); i++)
353     {
354         Ptr<WifiNetDevice> wifi = DynamicCast<WifiNetDevice> (*i);
355         macMWIM = DynamicCast<MeshWifiInterfaceMac> (wifi->GetMac ());
356     }
357
358     Ptr<PeerManagementProtocol> pmp = mpd->GetObject<PeerManagementProtocol>();
359     std::vector < Ptr<PeerLink> > prlks = pmp->GetPeerLinks();
360
361     for (std::vector<Ptr<PeerLink> >::const_iterator j = prlks.begin (); j != prlks.end (); j++)
362     {
363
364         std::map<Mac48Address, uint32_t>::iterator tmpIt = nodesTable.find((*j)->GetPeerAddress());
365         if (tmpIt != nodesTable.end())
```

[illegible]



```
405 {
406     std::cerr << "Error: Can't open file " << os.str () << "\n";
407     return;
408 }
409 #endif
410 Ptr<MeshPointDevice> mp = (*i)->GetObject<MeshPointDevice> ();
411 // std::vector<Ptr<NetDevice> > ifaces = mp->GetInterfaces ();
412 Ptr<PeerManagementProtocol> pmp = mp->GetObject<PeerManagementProtocol>();
413 std::vector < Ptr<PeerLink> > prlks = pmp->GetPeerLinks();
414
415 for (std::vector<Ptr<PeerLink> >::const_iterator j = prlks.begin (); j != prlks.end (); j++)
416 {
417     std::map<Mac48Address, uint32_t>::iterator tmpIt = nodesTable.find((*j)->GetPeerAddress());
418     if (tmpIt != nodesTable.end())
419     {
420         uint32_t tmpNodeId = tmpIt->second;
421         uint32_t tmpMetric = 0;
422         // (*j)->GetMetric();
423         ((uint32_t(*)[nodeNum])(matrixMetrics))[nodeId][tmpNodeId] = tmpMetric;
424     }
425     else
426     {
427         NS_LOG_ERROR("One of the MacAddress is not in the NodesTables, !That is impossible!");
428     }
429 }
430 #ifndef XML_OUT
431 mesh.Report (*i, of);
432 of.close ();
433 #endif
434 }
435 m_samples++;
436 std::ofstream ofpajek;
437 ofpajek.open (pajekFilename.c_str());
438 if (b_pajek)
439 {
440     ofpajek << "*Vertices " << nodeNum << std::endl;
441     for (uint32_t i = 0; i < nodeNum; i++)
442     {
443         Vector position = nodes.Get(i)->GetObject<MobilityModel>()->GetPosition();
444         ofpajek << i+1 << " " << i+1 << " " << position.x << " " << position.y << " " << position.z << std::endl;
445     }
446     ofpajek << "*Edges " << std::endl;
```




```
447 }
448
449 for (uint32_t i = 0; i < nodeNum; i++)
450 {
451     for (uint32_t j = 0; j < nodeNum; j++)
452     {
453         Ptr<MobilityModel> mmNodeI = nodes.Get(i)->GetObject<MobilityModel>();
454         Ptr<MobilityModel> mmNodeJ = nodes.Get(j)->GetObject<MobilityModel>();
455
456         uint32_t metrica = ((uint32_t(*)[nodeNum])(matrixMetrics))[i][j];
457         if (b_pajek)
458         {
459             if (metrica>0)
460                 //of << i << " " << j << " " << metrica << std::endl;
461                 ofpajek << i+1 << " " << j+1 << std::endl;
462         }
463     }
464 }
465
466 ofpajek.close ();
467
468 NS_LOG_INFO("Printing mesh point devices at time #" << Simulator::Now().GetSeconds() << "\n");
469 }
470
471 //*****
472 //      MeshTest::ReportPos
473 //*****
474 //Generates a file with node positions at each scheduled time
475 void
476 MeshTest::ReportPos ()
477 {
478     NS_LOG_INFO("Printing mesh point devices at time #" << Simulator::Now().GetSeconds() << "\n");
479 }
480
481 int main (int argc, char *argv[])
482 {
483
484     std::cout << "Mesh Simulator Begin" << std::endl;
485
486     LogComponentEnable ("MeshSim",LOG_DEBUG);
487
488     MeshTest t;
489     int res = t.Configure (argc, argv);
```

```
490 res=res==0?t.Run():-1;
491 std::cout << "Mesh Simulator End" << std::endl;
492 return res;
493 }
```

Listado B.1: Este código permite obtener las matrices de adyacencia y costes, utilizando NS-3 como plataforma de simulación

B.2. Generación de archivos Pajek.net

```
1 function write_matrix_to_pajek(matrix, path, varargin)
2
3 p.weighted=true;
4 p.threshold_low=0;
5 p.threshold_high=realmax;
6 p.directed=true;
7 p.labels={};
8 p.coords={};
9 p.routers={};
10 p.communities={};
11
12 validParams = { ...
13     'weighted', ...
14     'threshold_low', ...
15     'threshold_high', ...
16     'directed', ...
17     'labels', ...
18     'coords', ...
19     'communities', ...
20     'routers', ...
21 };
22
23 if nargin > 2
24     if mod( numel( varargin ), 2 ) ~= 0
25         error( 'write_matrix_to_pajek:InvalidInput', ['All input parameters after the fileName must be in the ' ...
26             'form of param-value pairs'] );
27     end
28     params = lower( varargin(1:2:end) );
29     values = varargin(2:2:end);
30
31 if ~all( cellfun( @ischar, params ) )
32     error( 'write_matrix_to_pajek:InvalidInput', ['All input parameters after the fileName must be in the ' ...
33         'form of param-value pairs'] );
```



```
34 end
35
36 lcValidParams = lower( validParams );
37 for ii = 1 : numel( params )
38     result = strmatch( params{ii}, lcValidParams );
39     % If unknown param is entered ignore it
40     if isempty( result )
41         continue
42     end
43     % If we have multiple matches make sure we don't have a single unambiguous match before throwing
44     % an error
45     if numel( result ) > 1
46         exresult = strmatch( params{ii}, validParams, 'exact' );
47         if ~isempty( exresult )
48             result = exresult;
49         else
50             % We have multiple possible matches, prompt user to provide an unambiguous match
51             error( 'write_matrix_to_pajek:InvalidInput', 'Cannot find unambiguous match for parameter '' %s'', ...
52                 varargin{ii*2-1} );
53         end
54     end
55     result = validParams{result};
56     p.(result) = values{ii};
57 end
58 end
59
60 [fid, msg] = fopen(path, 'w');
61
62 if fid < 0
63     error( 'write_matrix_to_pajek:InvalidPath', 'Could not open %s for writing: %s', path, msg );
64 end
65
66
67 if size(matrix,1)~=size(matrix,2)
68     error( 'write_matrix_to_pajek:InvalidMatrix', 'Matrix must be square.' );
69 end
70
71 N=size(matrix,1);
72 colors={ "white", "peach", "melon", "orange", "maroon", "salmon", "purple", "violet", "cyan", "green", "sepia", "
        brown", "tan", "pink", "yellow", "peach", "melon", "orange", "maroon", "salmon", "purple", "violet", "cyan", "
        green", "sepia", "brown", "tan", "pink" }; %white is for isolated nodes
73 %colors=["white", "yellow", "peach", "melon", "orange", "maroon", "salmon", "purple", "violet", "cyan", "green", "
        sepia", "brown", "tan", "pink"]; %white is for isolated nodes
```



```
74 % Write vertices
75 fprintf(fid,'*Vertices %i', N);
76 for i = 1 : N
77
78     fprintf(fid, '\n %i', i);
79     if (~isempty(p.labels))
80         fprintf(fid, ' "%s"', char(p.labels(i)));
81     else
82         fprintf(fid, ' "%i"', i);
83     end
84     %HASTA AHORA O SOLO INGRESO LOS ROUTERS O SOLO INGRESO LOS ID DE
      COMUNIDADES:
85     if (~isempty(p.coords))
86         if (~isempty(p.routers))
87             if p.routers(i) == 1      %ES ROUTER
88                 fprintf(fid, ' %f %f %f %s', p.coords(i,1), p.coords(i,2), p.coords(i,3), 'ic Blue');
89             elseif p.routers(i) == -1 %NO ES ROUTER
90                 fprintf(fid, ' %f %f %f %s', p.coords(i,1), p.coords(i,2), p.coords(i,3), 'ic Red');
91             else                      %ESTA AISLADO
92                 fprintf(fid, ' %f %f %f %s', p.coords(i,1), p.coords(i,2), p.coords(i,3), 'ic ForestGreen');
93             end
94         elseif (~isempty(p.communities))
95             fprintf(fid, ' %f %f %f %s %s', p.coords(i,1), p.coords(i,2), p.coords(i,3), 'ic ', colors{p.
communities(i)+1});
96         else                          %only print coordinates and no colors
97             fprintf(fid, ' %f %f %f', p.coords(i,1), p.coords(i,2), p.coords(i,3));
98         end
99     end
100
101 end
102
103 % Write edges
104 if p.directed == true
105     fprintf(fid, '\n*Arcs');
106 else
107     fprintf(fid, '\n*Edges');
108 end
109
110 for i = 1 : N
111     start = 1;
112     if (p.directed ~= true)
113         start = i;
114     end
```



```
115 for j = start : N
116     if (i ~= j)
117         value = matrix(i,j);
118         if value > p.threshold_low && value < p.threshold_high
119             fprintf(fid, '\n %i %i', i, j);
120             if p.weighted == true
121                 fprintf(fid, ' %f', value);
122             end
123         end
124     end
125 end
126 end
127
128 fclose(fid);
```

Listado B.2: Script de MATLAB utilizado para poder crear los archivos Pajek.net. Este Script se ha conseguido de una de las librerías incluidas en Matlab versión 2017.

B.3. Script para automatizar el proceso en NS-3 (actualizarMain.sh)

```

1 #!/bin/bash
2 #Parámetros de entrada
3 flow="40"
4 model='SLAW'
5 nodos='99'
6 metrica='clustering'
7
8 FILE="/home/invierno/Documentos/Josue_runs/Reactive_Traffic_"$flow"Flows/"
9 inputFile="/home/invierno/Descargas/ns-allinone-3.28/ns-3.28/main.cc"
10 outputFile="/home/invierno/Descargas/ns-allinone-3.28/ns-3.28/scratch/"
11 for i in {1..100..1};
12 do
13     rm $outputFile"mainAux.cc"
14
15     varAux1=$FILE"Run$i.cc"
16     sed "s/myFlowValue/"$flow"/" $inputFile >> $outputFile"mainAux.cc"
17     sed "s/myModelValue/"$model"/" $outputFile"/mainAux.cc" >> $outputFile"mainAux2.cc"
18     rm $outputFile"mainAux.cc"
19     sed "s/myNodosValue/"$nodos"/" $outputFile"mainAux2.cc" >> $outputFile"mainAux3.cc"
20     rm $outputFile"mainAux2.cc"
21     sed "s/myMetricaValue/"$metrica"/" $outputFile"mainAux3.cc" >> $outputFile"mainAux4.cc"
22     rm $outputFile"mainAux3.cc"
23     sed "s/myRunValue/"$i"/" $outputFile"mainAux4.cc" >> $outputFile"mainAux5.cc"
24     rm $outputFile"mainAux4.cc"
25     sed "203r $varAux1" $outputFile"mainAux5.cc" >> $outputFile"mainAux6.cc"
26     rm $outputFile"mainAux5.cc"
27
28     if [ $nodos -eq '100' ]; then
29         sed "23r '1,1,1,1,1,1,1,1,1,1';" $outputFile"mainAux6.cc" >> $outputFile"mainAux.cc"
30         rm $outputFile"mainAux6.cc"
31     elif [ $nodos -eq '99' ]; then
32         sed "23r '1,1,1,1,1,1,1,1,1,1';" $outputFile"mainAux6.cc" >> $outputFile"mainAux.cc"
33         rm $outputFile"mainAux6.cc"
34     elif [ $nodos -eq '98' ]; then
35         sed "23r '1,1,1,1,1,1,1,1,1';" $outputFile"mainAux6.cc" >> $outputFile"mainAux.cc"
36         rm $outputFile"mainAux6.cc"
37     elif [ $nodos -eq '97' ]; then
38         sed "23r '1,1,1,1,1,1,1';" $outputFile"mainAux6.cc" >> $outputFile"mainAux.cc"
39         rm $outputFile"mainAux6.cc"
40     elif [ $nodos -eq '96' ]; then
41         sed "23r '1,1,1,1,1,1';" $outputFile"mainAux6.cc" >> $outputFile"mainAux.cc"

```



```
42  rm $outputFile"mainAux6.cc"
43  elif [ $nodos -eq '95' ]; then
44      sed "23r '1,1,1,1,1';" $outputFile"mainAux6.cc" >> $outputFile"mainAux.cc"
45      rm $outputFile"mainAux6.cc"
46  elif [ $nodos -eq '94' ]; then
47      sed "23r '1,1,1,1,1';" $outputFile"mainAux6.cc" >> $outputFile"mainAux.cc"
48      rm $outputFile"mainAux6.cc"
49  elif [ $nodos -eq '93' ]; then
50      sed "23r '1,1,1,1';" $outputFile"mainAux6.cc" >> $outputFile"mainAux.cc"
51      rm $outputFile"mainAux6.cc"
52  elif [ $nodos -eq '92' ]; then
53      sed "23r '1,1,1';" $outputFile"mainAux6.cc" >> $outputFile"mainAux.cc"
54      rm $outputFile"mainAux6.cc"
55  elif [ $nodos -eq '91' ]; then
56      sed "23r '1,1';" $outputFile"mainAux6.cc" >> $outputFile"mainAux.cc"
57      rm $outputFile"mainAux6.cc"
58  elif [ $nodos -eq '90' ]; then
59      sed "23r '1';" $outputFile"mainAux6.cc" >> $outputFile"mainAux.cc"
60      rm $outputFile"mainAux6.cc"
61
62  fi
63
64  echo "Ejecucion nro : "$i
65  ./waf --run scratch/mainAux
66
67  done
```



Pablo Felipe Avilés Parra
Josue David Pinto Nieto



```
42  bool m_chan;
43  bool m_pcap;
44  std::string m_stack;
45  std::string m_root;
46  std::string m_root1;
47  std::string m_root2;
48  std::string m_root3;
49  double PathToRootTimeout;
50  double RootInterval;
51  int Nroots;
52  uint32_t m_maxPacketCount;
53  int nodeNum;
54  std::string traceFile;
55  std::string outFolder;
56  int m_runN;
57  int Flows;
58  int num_sim;
59  int Snapshot;
60
61  NodeContainer nodes;/// List of network nodes
62  NetDeviceContainer meshDevices; /// List of all mesh point devices
63  Ipv4InterfaceContainer interfaces; //Addresses of interfaces:
64  MeshHelper mesh; // MeshHelper. Report is not static methods
65
66 private:
67  /// Create nodes and setup their mobility
68  void CreateNodes ();
69  /// Install internet m_stack on nodes
70  void InstallInternetStack ();
71  /// Install applications
72  void InstallApplication ();
73  /// Print mesh devices diagnostics
74  void Report ();
75  void ReportTime ();
76  void ReportNode ();
77  };
78 MeshTest::MeshTest () :
79  m_randomStart (0.5),
80
81  m_totalTime (350), //simulation time
82  m_packetInterval (0.02),
83  m_packetSize (512),
84  m_nIfaces (1),
```



```
85 m_chan (true),
86 m_pcap (false),
87 m_stack ("ns3::Dot11sStack"),
88 m_root ("ff:ff:ff:ff:ff:ff"),
89 PathToRootTimeout (5120000), //DEFAULT VALUE
90 RootInterval (2048000), //DEFAULT VALUE
91 m_maxPacketCount (10000),
92 nodeNum (myNodeValue), // number of nodes in our network
93
94 traceFile ("myMetricValuemyModelValuemyNodosValue.txt"), //traceFile
95 outFolder ("/home/invierno/Descargas/ns-allinone-3.28/ns-3.28/Resultados/myFlowValueflow/
    myModelValue/myNodosValueNodos/myMetricaValue/runmyRunValue")//<===== my Output
96
97 {
98 }
99 //*****
100 // MeshTest::Configure
101 //*****
102 void
103 MeshTest::Configure (int argc, char *argv[])
104 {
105     CommandLine cmd;
106     cmd.AddValue ("start", "Maximum random start delay, seconds. [0.1 s]", m_randomStart);
107     cmd.AddValue ("time", "Simulation time, seconds [500 s]", m_totalTime);
108     cmd.AddValue ("packet-interval", "Interval between packets in UDP ping, seconds [0.001 s]",
        m_packetInterval);
109     cmd.AddValue ("packet-size", "Size of packets in UDP ping", m_packetSize);
110     cmd.AddValue ("interfaces", "Number of radio interfaces used by each mesh point. [1]", m_nIfaces);
111     cmd.AddValue ("channels", "Use different frequency channels for different interfaces. [0]", m_chan);
112     cmd.AddValue ("pcap", "Enable PCAP traces on interfaces. [0]", m_pcap);
113     cmd.AddValue ("stack", "Type of protocol stack. ns3::Dot11sStack by default", m_stack);
114     cmd.AddValue ("root1", "Mac address of root1 mesh point in HWMP", m_root1);
115     cmd.AddValue ("root2", "Mac address of root2 mesh point in HWMP", m_root2);
116     cmd.AddValue ("root3", "Mac address of root3 mesh point in HWMP", m_root3);
117     cmd.AddValue ("PTRtimeout", "Lifetime of proactive routing information", PathToRootTimeout);
118     cmd.AddValue ("Rinterval", "Interval between two successive proactive PREQs", RootInterval);
119     cmd.AddValue ("Nroots", "Number of roots in network", Nroots);
120     cmd.AddValue ("maxPacketCount", "Maximum TX packets", m_maxPacketCount);
121     cmd.AddValue ("nodeNum", "Number of nodes", nodeNum);
122     cmd.AddValue ("traceFile", "Ns2 movement trace file", traceFile);
123     cmd.AddValue ("outFolder", "Output folder for simulation results", outFolder);
124     cmd.AddValue ("m_runN", "Number of run execution ", m_runN);
125     cmd.AddValue ("Flows", "Number of flows", Flows);
```



```
126 cmd.AddValue ("num_sim","number of actual Snapshot", num_sim );
127 cmd.AddValue ("Snapshot","number of actual Snapshot", Snapshot );
128 cmd.Parse (argc, argv);
129 NS_LOG_DEBUG ("Simulation time: " << m_totalTime << " s");
130 }
131 //*****
132 // MeshTest::CreateNodes
133 //*****
134
135 void
136 MeshTest::CreateNodes ()
137 {
138     // Create Ns2MobilityHelper with the specified trace log file as parameter
139     Ns2MobilityHelper ns2 = Ns2MobilityHelper (traceFile);
140     nodes.Create (nodeName);
141     ns2.Install (); // configure movements for each node, while reading trace file
142     // Configure YansWifiChannel
143     YansWifiPhyHelper wifiPhy = YansWifiPhyHelper::Default ();
144     YansWifiChannelHelper wifiChannel = YansWifiChannelHelper::Default ();
145     wifiPhy.SetChannel (wifiChannel.Create ());
146
147     mesh = MeshHelper::Default ();
148     if (!Mac48Address (m_root.c_str ()).IsBroadcast ())
149     {
150         mesh.SetStackInstaller (m_stack, "Root", Mac48AddressValue (Mac48Address (m_root.c_str ())));
151     }
152     else
153     {
154         //If root is not set, we do not use "Root" attribute, because it
155         //is specified only for 11s
156         mesh.SetStackInstaller (m_stack);
157     }
158     if (m_chan)
159     {
160         mesh.SetSpreadInterfaceChannels (MeshHelper::SPREAD_CHANNELS);
161     }
162     else
163     {
164         mesh.SetSpreadInterfaceChannels (MeshHelper::ZERO_CHANNEL);
165     }
166     mesh.SetMacType ("RandomStart", TimeValue (Seconds (m_randomStart)));
167     mesh.SetNumberOfInterfaces (m_nIfaces);// Set number of interfaces – default is single–interface mesh
        point
```



```
168 meshDevices = mesh.Install (wifiPhy, nodes); // Install protocols and return container if MeshPointDevices
169 std::ostream ossss;
170 for (int i=0; i<100; i++)
171 {
172     if (Routers [i] == 0)
173     {
174         ossss.str("");
175         ossss << "/NodeList/" << i << "/DeviceList/0/$ns3::MeshPointDevice/RoutingProtocol/$ns3::dot11s::
            HwmpProtocol/IsRouter";
176         Config::Set (ossss.str(), BooleanValue (false));
177     }
178 }
179 if (m_pcap)
180     wifiPhy.EnablePcapAll (std::string ("mp-"));
181 }
182 //*****
183 // MeshTest::InstallInternetStack
184 //*****
185 void
186 MeshTest::InstallInternetStack ()
187 {
188     InternetStackHelper internetStack;
189     internetStack.Install (nodes);
190     Ipv4AddressHelper address;
191     address.SetBase ("10.1.1.0", "255.255.255.0");
192     interfaces = address.Assign (meshDevices);
193 }
194 //*****
195 // MeshTest::InstallApplication
196 //*****
197 void
198 MeshTest::InstallApplication ()
199 {
200     std::cout << "*****Flow: " << Flows << " --- Run: " << m_runN << "
            *****\n";
201
202
203     //include "TrafficFlowDirectory"
204
205
206     std::cout << "\n";
207 }
208 //*****
```



```
209 // MeshTest::Run()
210 //*****
211 int
212 MeshTest::Run ()
213 {
214     CreateNodes ();
215     InstallInternetStack ();
216     InstallApplication ();
217     //schedulers
218     for (int i=1; i<=m_totalTime; i=i+1)
219     {
220         Simulator::Schedule (Seconds (i), &MeshTest::ReportTime, this); // Solo para mostrar el tiempo virtual de
            simulacion
221     }
222     Simulator::Schedule (Seconds (m_totalTime), &MeshTest::ReportNode, this); // Reporte de c/nodo al final
        de la simulacion
223     Simulator::Stop (Seconds (m_totalTime)); //fijo el tiempo en el que debe detenerse
224     //FlowMonitor
225     Ptr<FlowMonitor> flowMon;
226
227     FlowMonitorHelper flowMonHelper;
228     flowMon = flowMonHelper.InstallAll();
229     //RUN
230     Simulator::Run ();
231     std::ostringstream oss;
232     oss << outFolder << "/Sim0" << num_sim << "/Snap_" << Snapshot << "/Flow_Mon/R" << Nroots << "
        F" << Flows << "T" << PathToRootTimeout/10000 << "0000_Run" << m_runN << ".xml";
233     flowMon->SerializeToXmlFile(oss.str(), true, true);
234     Simulator::Destroy ();
235     return 0;
236 }
237 //*****
238 // MeshTest::ReportTime
239 //*****
240 void
241 MeshTest::ReportTime ()
242 {
243     std::cerr << "Virtual time simulation: " << Simulator::Now().GetSeconds() << "\n";
244 }
245 //*****
246 // MeshTest::ReportNode
247 //*****
248 void
```



```
249 MeshTest::ReportNode ()
250 {
251     unsigned n (0);
252     for (NetDeviceContainer::Iterator i = meshDevices.Begin (); i != meshDevices.End (); ++i, ++n)
253     {
254         std::ostringstream os;
255         //Output directory of our results
256         os << outFolder << "/Node" << n << ".xml";
257
258         std::ofstream of;
259         of.open (os.str ().c_str ());
260         if (!of.is_open ())
261         {
262             std::cerr << "Error: Can't open file " << os.str () << "\n";
263             return;
264         }
265         mesh.Report (*i, of);
266         of.close ();
267     }
268
269     std::cerr << "Printing mesh point devices at time #" << Simulator::Now().GetSeconds() << "\n";
270     std::cerr << "Node Reporte Successful\n";
271 }
272 //*****
273 // main
274 //*****
275 int
276 main (int argc, char *argv[])
277 {
278     MeshTest t;
279     t.Configure (argc, argv);
280     return t.Run ();
281 }
```



B.5. Script para automatizar la actualización de trazas (actualizarNodos.sh)

```
1  #!/bin/bash
2  #Parámetros de entrada
3  nodeOld=39
4  model='SWIM'
5  nodos='96'
6  metrica='degree'
7  FILE='/home/invierno/Documentos/'
8
9  varAux1=$FILE$metrica$model$nodos".txt"
10 sed -i "/node_("$nodeOld")/d" $varAux1
11 for i in {0..99..1}; #nuevos nodos
12 do
13     if [ $i -gt $nodeOld ]; then
14         nodeNew="node_($i)"
15         echo $nodeNew
16         sed -i "s/node_("$nodeOld")/"$nodeNew"/" $varAux1
17         let "nodeOld=nodeOld+1"
18     fi
19 done
```



B.6. Script para automatizar la obtención de resultados (obtenerPDR.sh)

```
1  #!/bin/bash
2  #Parametros de entrada
3  flow="5"
4  model='SWIM'
5  nodos='100'
6  metrica='betweenness'
7
8
9  #directorios de los 100 runs
10 for i in {1..10..1};
11 do
12     dir="/home/invierno/Descargas/ns-allinone-3.28/ns-3.28/Resultados/"$flow"$flow/"$model"/"$nodos"
13     Nodos/"$metrica
14     j=0
15     dirAux=$dir"/run$i/Node$j.xml"
16     if [ -e $dirAux ]
17     then
18         while [ $j -lt $nodos ]; do
19
20             dirAux=$dir"/run$i/Node$j.xml"
21             tx=$(awk 'NR==67' $dirAux)
22             rx=$(awk 'NR==69' $dirAux)
23
24             rxBytes=$(grep -oPm1 '(?<=rxMgtBytes=")[^"]+' <<< $rx)
25             txBytes=$(grep -oPm1 '(?<=txMgtBytes=")[^"]+' <<< $tx)
26
27             #la funcion calc se requiere instalar en linux y permite realizar divisiones
28             PDR=$(calc $rxBytes/$txBytes)
29
30             varAux=$dir"/resultados.txt"
31             echo "$i;$j;$txBytes;$rxBytes;$PDR" >> $varAux
32
33             let j=j+1
34         done
35     else
36         echo "No hay información de la simulación "$i" o el directorio $dir es incorrecto"
37     fi
38 done
```




Bibliografía

- [1] A. M. V. Rodas, "Contribution to the improvement of the performance of wireless mesh networks providing real time services," Ph.D. dissertation, Ph. D. Dissertation, Network Engineering Department, UPC, 2015.
- [2] J. D. Belesaca Mendieta y C. R. Criollo Cumbe, "Control de topología en redes inalámbricas de tipo malla con estructura de comunidades," B.S. thesis, 2018.
- [3] A.-S. K. Pathan, *Security of self-organizing networks: MANET, WSN, WMN, VANET*. CRC press, 2016.
- [4] G. Aloï, M. Di Felice, V. Loscrì, P. Pace, y G. Ruggeri, "Spontaneous smartphone networks as a user-centric solution for the future internet," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, num. 12, pp. 26–33, 2014.
- [5] A. Iera, A. Molinaro, S. Y. Paratore, G. Ruggeri, y A. Zurzolo, "Making a mesh router/gateway from a smartphone: Is that a practical solution?" *Ad Hoc Networks*, vol. 9, num. 8, pp. 1414–1429, 2011.
- [6] G. Aloï, L. Bedogni, M. D. Felice, V. Loscri, A. Molinaro, E. Natalizio, P. Pace, G. Ruggeri, A. Trotta, y N. R. Zema, "Stem-net: an evolutionary network architecture for smart and sustainable cities," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 25, num. 1, pp. 21–40, 2014.
- [7] P. Krysta y B. Vöcking, "Online mechanism design (randomized rounding on the fly)," *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 7392 LNCS, num. PART 2, pp. 636–647, 2012.
- [8] J. Tang, I. Leontiadis, S. Scellato, V. Nicosia, C. Mascolo, M. Musolesi, y V. Latora, "Models, Entropy and Information of Temporal Social Network," pp. 135–159, 2013. [En línea]. Disponible: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-36461-7>
- [9] F. De, V. Fallani, J. Richiardi, M. Chavez, y S. Achard, "in translational neuroscience Graph analysis of functional brain networks: practical issues Graph analysis of functional brain networks: practical issues in translational neuroscience," num. September, 2013. [En línea]. Disponible: <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/369/1653/20130521.full.html{#}ref-list-1{%}5Cnhttp://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0521>
- [10] C. Ni, C. R. Sugimoto, y J. Jiang, "Degree, Closeness, and Betweenness: Application of group centrality measurements to explore macro-disciplinary evolution diachronically," *Proceedings of ISSI 2011*, num. January 2011, 2011.
- [11] E. M. Aylward, P. A. Parrilo, y J.-J. E. Slotine, "Stability and robustness analysis of nonlinear systems via contraction metrics and sos programming," *Automatica*, vol. 44, num. 8, pp. 2163–2170, 2008.



- [12] A. Mahmood, U. Usman, y L. Wang, "Csr: A centrality based on robustness and controllable subspace of complex networks," in *2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*. IEEE, 2019, pp. 1280–1285.
- [13] R. Albert, H. Jeong, y A.-L. Barabási, "Error and attack tolerance of complex networks," *nature*, vol. 406, num. 6794, p. 378, 2000.
- [14] T. Camp, J. Boleng, y V. Davies, "A survey of mobility models for ad hoc network research," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2, num. 5, pp. 483–502, 2002.
- [15] R. M. Nosofsky y T. J. Palmeri, "An exemplar-based random walk model of speeded classification." *Psychological review*, vol. 104, num. 2, p. 266, 1997.
- [16] M. Jamali y M. Ester, "Trustwalker: a random walk model for combining trust-based and item-based recommendation," in *Proceedings of the 15th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*. ACM, 2009, pp. 397–406.
- [17] P. Flajolet y A. M. Odlyzko, "Random mapping statistics," in *Workshop on the Theory and Application of Cryptographic Techniques*. Springer, 1989, pp. 329–354.
- [18] P. Nain, D. Towsley, B. Liu, y Z. Liu, "Properties of random direction models," in *Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies.*, vol. 3. IEEE, 2005, pp. 1897–1907.
- [19] D. Karamshuk, C. Boldrini, M. Conti, y A. Passarella, "Human mobility models for opportunistic networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, num. 12, pp. 157–165, 2011.
- [20] A. Mei y J. Stefa, "SWIM: A simple model to generate small mobile worlds," *Proceedings - IEEE INFOCOM*, num. 215923, pp. 2106–2113, 2009.
- [21] A. Munjal, T. Camp, y W. Navidi, "SMOOTH: a simple way to model human walks," *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 14, num. 4, p. 34, 2011.
- [22] K. Lee, S. Hong, S. J. Kim, I. Rhee, y S. Chong, "SLAW: Self-similar least-action human walk," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 20, num. 2, pp. 515–529, 2012.
- [23] M. Schwamborn y N. Aschenbruck, "Introducing geographic restrictions to the slaw human mobility model," in *2013 IEEE 21st international symposium on modelling, analysis and simulation of computer and telecommunication systems*. IEEE, 2013, pp. 264–272.
- [24] N. Aschenbruck, M. Frank, P. Martini, y J. Tolle, "Human mobility in manet disaster area simulation-a realistic approach," in *29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks*. IEEE, 2004, pp. 668–675.
- [25] L. C. Freeman, "A set of measures of centrality based on betweenness," *Sociometry*, pp. 35–41, 1977.
- [26] "Clustering Coefficient - an overview | ScienceDirect Topics." [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/clustering-coefficient>
- [27] A. Clauset, M. E. Newman, y C. Moore, "Finding community structure in very large networks," *Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, vol. 70, num. 6, p. 6, 2004.

- [28] A. E. Sariyuce, K. Kaya, E. Saule, y U. V. Catalyiirek, "Incremental algorithms for closeness centrality," *Proceedings - 2013 IEEE International Conference on Big Data, Big Data 2013*, pp. 487–492, 2013.
- [29] J. A. Barnes y F. Harary, "Graph theory in network analysis," 1983.
- [30] A. Disney, "Eigencentrality and pagerank," *Cambridge Intelligence*, December 2015. [En línea]. Disponible: <https://cambridge-intelligence.com/eigencentrality-pagerank/>
- [31] N. Meghanathan, "A random network model with high clustering coefficient and variation in node degree," in *2015 8th International Conference on Control and Automation (CA)*. IEEE, 2015, pp. 54–57.
- [32] A.-L. Barabási, *Network Science*. Cambridge University Press, 2016. [En línea]. Disponible: <http://networksciencebook.com/>
- [33] A. Disney, "Social network analysis: Centrality measures," *Cambridge Intelligence*, December 2014. [En línea]. Disponible: <https://cambridge-intelligence.com/keylines-faqs-social-network-analysis/>
- [34] H. Nishiyama, M. Ito, y N. Kato, "Relay-by-smartphone: realizing multihop device-to-device communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, num. 4, pp. 56–65, 2014.
- [35] M. Di Felice, L. Bedogni, A. Trotta, L. Bononi, F. Panzieri, G. Ruggeri, G. Aloï, V. Loscrì, y P. Pace, "Smartphones like stem cells: cooperation and evolution for emergency communication in post-disaster scenarios," in *2013 first international Black Sea conference on communications and networking (Black-SeaCom)*. IEEE, 2013, pp. 28–33.
- [36] A. Cabrera Gambín, "Estudio de la dimensión métrica de grafos mediante algoritmos evolutivos," 2009.
- [37] A. Jardosh, E. M. Belding-Royer, K. C. Almeroth, y S. Suri, "Towards realistic mobility models for mobile ad hoc networks," in *Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*. ACM, 2003, pp. 217–229.
- [38] J. Yoon, M. Liu, y B. Noble, "Random waypoint considered harmful," in *IEEE INFOCOM 2003. Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No.03CH37428)*, vol. 2, March 2003, pp. 1312–1321 vol.2.
- [39] G. Resta y P. Santi, "An analysis of the node spatial distribution of the random waypoint mobility model for ad hoc networks," in *Proceedings of the second ACM international workshop on Principles of mobile computing*. ACM, 2002, pp. 44–50.
- [40] C. Bettstetter, "Smooth is better than sharp: a random mobility model for simulation of wireless networks," in *Proceedings of the 4th ACM international workshop on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*. ACM, 2001, pp. 19–27.
- [41] —, "Mobility modeling in wireless networks: categorization, smooth movement, and border effects," *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 5, num. 3, pp. 55–66, 2001.
- [42] S. Pomportes, J. Tomasik, y V. Vèque, "Ad hoc network in a disaster area: A composite mobility model and its evaluation," in *The 2010 International Conference on Advanced Technologies for Communications*. IEEE, 2010, pp. 17–22.



- [43] N. Aschenbruck, A. Munjal, y T. Camp, "Trace-based mobility modeling for multi-hop wireless networks," *Computer Communications*, vol. 34, num. 6, pp. 704–714, 2011. [En línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2010.11.002>
- [44] V. V. Selvi, S. Sharfraz, y R. Parthasarathi, "Mobile ad hoc grid using trace based mobility model," in *International Conference on Grid and Pervasive Computing*. Springer, 2007, pp. 274–285.
- [45] M. Schwamborn, N. Aschenbruck, y P. Martini, "A realistic trace-based mobility model for first responder scenarios," in *Proceedings of the 13th ACM international conference on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems*. ACM, 2010, pp. 266–274.
- [46] F. Bai y A. Helmy, "A survey of mobility models," *Wireless Adhoc Networks. University of Southern California, USA*, vol. 206, p. 147, 2004.
- [47] M. Kim, D. Kotz, y S. Kim, "Extracting a mobility model from real user traces," 2006.
- [48] A. Keränen, J. Ott, y T. Kärkkäinen, "The one simulator for dtn protocol evaluation," in *Proceedings of the 2nd international conference on simulation tools and techniques*. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and ... , 2009, p. 55.
- [49] M. Musolesi y C. Mascolo, "Mobility models for systems evaluation," in *Middleware for network eccentric and mobile applications*. Springer, 2009, pp. 43–62.
- [50] —, "Designing mobility models based on social network theory," *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 11, num. 3, p. 59, 2007.
- [51] T. Camp, J. Boleng, y V. Davies, "A survey of mobility models for ad hoc network research," *Wireless communications and mobile computing*, vol. 2, num. 5, pp. 483–502, 2002.
- [52] —, "A survey of mobility models for ad hoc network research," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2, num. 5, pp. 483–502, 2002. [En línea]. Disponible: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wcm.72>
- [53] V. A. Davies y otros, "Evaluating mobility models within an ad hoc network," Master's thesis, Citeseer, 2000.
- [54] S. Isaacman, R. Becker, R. Cáceres, M. Martonosi, J. Rowland, A. Varshavsky, y W. Willinger, "Human mobility modeling at metropolitan scales," in *Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services*. ACM, 2012, pp. 239–252.
- [55] E. Atsan y Ö. Özkasap, "A classification and performance comparison of mobility models for ad hoc networks," in *International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless*. Springer, 2006, pp. 444–457.
- [56] M. G. And y C. de Waal, "A Mobility Scenario Generation and Analysis Tool," pp. 1–31, 2015. [En línea]. Disponible: <http://bonnmotion.net/>.
- [57] V. Timcenko, M. Stojanovic, y S. B. Rakas, "Manet routing protocols vs. mobility models: performance analysis and comparison," in *Proceedings of the 9th WSEAS international conference on Applied informatics and communications*. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 2009, pp. 271–276.

- [58] J. Nolan, *Stable distributions: models for heavy-tailed data*. Birkhauser Boston, 2003.
- [59] T. Karagiannis, J.-Y. Le Boudec, y M. Vojnovic, "Power law and exponential decay of intercontact times between mobile devices," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 9, num. 10, pp. 1377–1390, 2010.
- [60] S. Y. Park y A. K. Bera, "Maximum entropy autoregressive conditional heteroskedasticity model," *Journal of Econometrics*, vol. 150, num. 2, pp. 219–230, 2009. [En línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeconom.2008.12.014>
- [61] N. Aschenbruck, E. Gerhards-Padilla, M. Gerharz, M. Frank, y P. Martini, "Modelling mobility in disaster area scenarios," in *Proceedings of the 10th ACM Symposium on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems*. ACM, 2007, pp. 4–12.
- [62] J. Kim, V. Sridhara, y S. Bohacek, "Realistic mobility simulation of urban mesh networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 7, num. 2, pp. 411–430, 2009. [En línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2008.04.008>
- [63] M. J. Plank, M. Auger-Méthé, y E. A. Codling, "Lévy or not? analysing positional data from animal movement paths," in *Dispersal, individual movement and spatial ecology*. Springer, 2013, pp. 33–52.
- [64] R. Metzler, J.-H. Jeon, A. G. Cherstvy, y E. Barkai, "Anomalous diffusion models and their properties: non-stationarity, non-ergodicity, and ageing at the centenary of single particle tracking," *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 16, num. 44, pp. 24 128–24 164, 2014.
- [65] I. Rhee, M. Shin, S. Hong, K. Lee, S. J. Kim, y S. Chong, "On the levy-walk nature of human mobility," *IEEE/ACM transactions on networking (TON)*, vol. 19, num. 3, pp. 630–643, 2011.
- [66] J. Murray, P. Wettin, P. P. Pande, y B. Shirazi, "Complex Network Inspired NoC Architecture," *Sustainable Wireless Network-on-Chip Architectures*, pp. 23–36, 2016.
- [67] T. Camp, J. Boleng, y V. Davies, "A survey of mobility models for ad hoc network research," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2, num. 5, pp. 483–502, 2002. [En línea]. Disponible: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wcm.72>
- [68] F. Bai y A. Helmy, "A survey of mobility models," *Wireless Adhoc Networks. University of Southern California, USA*, vol. 206, p. 147, 2004.
- [69] A. K. Saha y D. B. Johnson, "Modeling mobility for vehicular ad hoc networks," *VANET - Proceedings of the First ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*, pp. 91–92, 2004.
- [70] B. B. Mandelbrot, *The fractal geometry of nature*. WH freeman New York, 1983, vol. 173.
- [71] I. Norros, P. Mannersalo, y J. L. Wang, "Simulation of fractional brownian motion with conditionalized random midpoint displacement," *Advances in Performance Analysis*, vol. 2, num. 1, pp. 77–101, 1999.
- [72] M. C. Gonzalez, C. A. Hidalgo, y A.-L. Barabasi, "Understanding individual human mobility patterns," *nature*, vol. 453, num. 7196, p. 779, 2008.
- [73] D. Brockmann, L. Hufnagel, y T. Geisel, "The scaling laws of human travel," *Nature*, vol. 439, num. 7075, p. 462, 2006.

-
- [74] B. Ramasamy, B. Ramasamy, T. Iyer, T. Iyer, P. Varadharajan, y P. Varadharajan, "Fractals: A new geometry of nature," *Resonance*, vol. 2, num. 10, 1997.
- [75] N. Aschenbruck, E. Gerhards-Padilla, y P. Martini, "Modeling mobility in disaster area scenarios," *Performance Evaluation*, vol. 66, num. 12, pp. 773–790, 2009.
- [76] A. Rezaei, J. Gao, J. M. Phillips, y C. D. Tóth, "Improved bounds on information dissemination by manhattan random waypoint model," in *Proceedings of the 26th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*. ACM, 2018, pp. 139–148.
- [77] M. Priyan y G. U. Devi, "Energy efficient node selection algorithm based on node performance index and random waypoint mobility model in internet of vehicles," *Cluster Computing*, vol. 21, num. 1, pp. 213–227, 2018.
- [78] F. T. Al Rabee, A. Al-Rimawi, y R. D. Gitlin, "Channel capacity in a dynamic random waypoint mobility model," in *2018 9th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)*. IEEE, 2018, pp. 711–715.
- [79] D. Katsaros, N. Dimokas, y L. Tassiulas, "Social network analysis concepts in the design of wireless Ad Hoc network protocols," *IEEE Network*, vol. 24, num. 6, pp. 23–29, 2010.
- [80] S. P. Borgatti, "Centrality and network flow," *Social Networks*, vol. 27, num. 1, pp. 55–71, 2005.
- [81] L. C. Freeman, "Centrality in social networks conceptual clarification," *Social networks*, vol. 1, num. 3, pp. 215–239, 1978.
- [82] V. D. Blondel, J.-L. Guillaume, R. Lambiotte, y E. Lefebvre, "Fast unfolding of communities in large networks," *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, vol. 2008, num. 10, p. P10008, oct 2008. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1088%2F1742-5468%2F2008%2F10%2Fp10008>
- [83] N. Biggs, N. L. Biggs, y B. Norman, *Algebraic graph theory*. Cambridge university press, 1993, vol. 67.
- [84] J. M. Fernández, *Cálculo de trayectos mediante algoritmos de búsqueda informada sobre grafos ponderados no dirigidos*. Universidad Politécnica de Madrid, 2018.
- [85] M. Needham y A. E. Hodler, *Graph Algorithms: Practical Examples in Apache Spark and Neo4j*. O'Reilly Media, 2019.
- [86] K. Okamoto, W. Chen, y X. Y. Li, "Ranking of closeness centrality for large-scale social networks," *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 5059 LNCS, pp. 186–195, 2008.
- [87] C. F. Negre, U. N. Morzan, H. P. Hendrickson, R. Pal, G. P. Lisi, J. Patrick Loria, I. Rivalta, J. Ho, y V. S. Batista, "Eigenvector centrality for characterization of protein allosteric pathways," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 115, num. 52, pp. E12 201–E12 208, 2018.
- [88] M. Newman y M. E. J. Newman, "Mathematics of networks," *Networks*, pp. 109–167, 2010.
- [89] W. Maharani, A. A. Gozali y otros, "Degree centrality and eigenvector centrality in twitter," in *2014 8th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA)*. IEEE, 2014, pp. 1–5.
-



-
- [90] M. Franceschet, "Ten good reasons to use the eigenfactor™ metrics," *Information Processing & Management*, vol. 46, num. 5, pp. 555–558, 2010.
- [91] P. W. Holland y S. Leinhardt, "Transitivity in structural models of small groups," *Comparative group studies*, vol. 2, num. 2, pp. 107–124, 1971.
- [92] D. J. Watts y S. H. Strogatz, "Collective dynamics of 'small-world' networks," *nature*, vol. 393, num. 6684, p. 440, 1998.
- [93] C. Hernando, M. Mora, I. M. Pelayo, y C. Seara, "Some structural, metric and convex properties on the boundary of a graph," *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, vol. 24, pp. 203–209, 2006.
- [94] P. Schalk, R. Ofner, y P. O'Leary, "Pipe eccentricity measurement using laser triangulation," *Image and Vision Computing*, vol. 25, num. 7, pp. 1194–1203, 2007.
- [95] S. Perumal, P. Basu, y Z. Guan, "Minimizing eccentricity in composite networks via constrained edge additions," in *MILCOM 2013-2013 IEEE Military Communications Conference*. IEEE, 2013, pp. 1894–1899.
- [96] V. Blondel, J.-L. Guillaume, R. Lambiotte, y E. Lefebvre, "Fast unfolding of communities in large networks," *Journal of Statistical Mechanics Theory and Experiment*, vol. 2008, 04 2008.
- [97] R. Lambiotte, J. C. Delvenne, y M. Barahona, "Random walks, Markov processes and the multiscale modular organization of complex networks," *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, vol. 1, num. 2, pp. 76–90, 2014.
- [98] L. Cuadra, S. Salcedo-Sanz, J. Del Ser, S. Jiménez-Fernández, y Z. W. Geem, "A critical review of robustness in power grids using complex networks concepts," *Energies*, vol. 8, num. 9, pp. 9211–9265, 2015.
- [99] W. Ellens y R. E. Kooij, "Graph measures and network robustness," *arXiv preprint arXiv:1311.5064*, 2013.
- [100] B. Mukherjee, M. F. Habib, y F. Dikbiyik, "Network adaptability from disaster disruptions and cascading failures," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, num. 5, pp. 230–238, 2014.
- [101] J. P. Sterbenz, E. K. Çetinkaya, M. A. Hameed, A. Jabbar, y J. P. Rohrer, "Modelling and analysis of network resilience," *2011 3rd International Conference on Communication Systems and Networks, COMSNETS 2011*, 2011.
- [102] P. A. Lotfy y M. A. Azer, "Performance evaluation of AODV under dos attacks," *Proceedings of 2013 6th Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference, WMNC 2013*, 2013.
- [103] S. Bhattarai, S. Wei, S. Rook, W. Yu, R. F. Erbacher, y H. Cam, "On simulation studies of jamming threats against LTE networks," *2015 International Conference on Computing, Networking and Communications, ICNC 2015*, pp. 99–103, 2015.
- [104] M. Ikeda, T. Honda, T. Oda, S. Sakamoto, y L. Barolli, "Analysis of wmn-ga simulation results: Wmn performance considering stationary and mobile scenarios," in *2014 IEEE 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, 2014, pp. 337–342.
-

-
- [105] A. M. Mashraqi y T. Erlebach, "Delay and interference aware metric in multi-channel wireless mesh network," Jun 2016. [En línea]. Disponible: <https://hdl.handle.net/2381/42319>
- [106] R. Enger y J. Reynolds, "Fyi on a network management tool catalog: Tools for monitoring and debugging tcp/ip internets and interconnected devices," RFC 1470, June, Tech. Rep., 1993.
- [107] T. Naeem y K.-K. Loo, "Common security issues and challenges in wireless sensor networks and iee 802.11 wireless mesh networks," 3; 1, 2009.
- [108] S. Khan, K.-K. Loo, T. Naeem, y M. A. Khan, "Denial of service attacks and challenges in broadband wireless networks," 8; 7, 2008.
- [109] K. Chadha y S. Jain, "Impact of black hole and gray hole attack in aodv protocol," in *International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE-2014)*. IEEE, 2014, pp. 1–7.
- [110] M. Roopak y D. B. Reddy, "Performance analysis of aodv protocol under black hole attack," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 2, num. 8, p. 1, 2011.
- [111] S. Mohapatra y P. Kanungo, "Comparative performance analysis of manet routing protocols using ns2 simulator," in *International Conference on Computational Intelligence and Information Technology*. Springer, 2011, pp. 731–736.
- [112] E. K. Çetinkaya, D. Broyles, A. Dandekar, S. Srinivasan, y J. P. Sterbenz, "A comprehensive framework to simulate network attacks and challenges," *2010 International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2010*, pp. 538–544, 2010.
- [113] D. Zhang, S. A. Gogi, D. S. Broyles, E. K. Çetinkaya, y J. P. Sterbenz, "Modelling attacks and challenges to wireless networks," *International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops*, pp. 806–812, 2012.
- [114] S. Zhang, Z. Zhang, C. Liu, W. Gu, C. Yang, Y. Fang, y J. Wang, "Vulnerabilities of mobile ad hoc network using centrality metrics," in *2017 International Conference on Computer Technology, Electronics and Communication (ICCTEC)*. IEEE, 2017, pp. 1370–1373.
- [115] A. Sydney, C. Scoglio, M. Youssef, y P. Schumm, "Characterizing the robustness of complex networks," *arXiv preprint arXiv:0811.3272*, 2008.
- [116] P. Holme, B. J. Kim, C. N. Yoon, y S. K. Han, "Attack vulnerability of complex networks," *Physical review E*, vol. 65, num. 5, p. 056109, 2002.
- [117] J. C. Doyle, D. L. Alderson, L. Li, S. Low, M. Roughan, S. Shalunov, R. Tanaka, y W. Willinger, "The "robust yet fragile" nature of the internet," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 102, num. 41, pp. 14 497–14 502, 2005.
- [118] S.-T. Park, A. Khrabrov, D. M. Pennock, S. Lawrence, C. L. Giles, y L. H. Ungar, "Static and dynamic analysis of the internet's susceptibility to faults and attacks," in *IEEE INFOCOM 2003. Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No. 03CH37428)*, vol. 3. IEEE, 2003, pp. 2144–2154.
-

-
- [119] M. Backhaus, M. Theil, M. Rossberg, y G. Schaefer, “Robust and scalable routing in wireless mesh networks using interference-disjoint backup paths,” in *2019 12th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*. IEEE, 2019, pp. 103–110.
- [120] B. Milic y M. Malek, *NPART-node placement algorithm for realistic topologies in wireless multihop network simulation*. Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät . . . , 2008.
- [121] “Documentation - SUMO Documentation.” [En línea]. Disponible: <https://sumo.dlr.de/docs/SUMO{ }User{ }Documentation.html>
- [122] N.-. Project. (2019) NS-3.29. [En línea]. Disponible: <https://www.nsnam.org>
- [123] P. Owczarek, M. Piechowiak, y P. Zwierzykowski, “Analysis of routing protocols metrics for wireless mesh networks,” in *Information Systems Architecture and Technology: Proceedings of 37th International Conference on Information Systems Architecture and Technology–ISAT 2016–Part II*. Springer, 2017, pp. 177–186.
- [124] L. Kajdoci y J. Kovács, “Issue on implementation possibility of bluetooth mesh capabilities into omnet++,” in *2018 IEEE 16th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*. IEEE, 2018, pp. 000 203–000 208.
- [125] W. Shi, L. Zhai, M. Ouyang, y J. Zhang, “A mobile edge computing server deployment scheme in wireless mesh network,” in *2019 IEEE/CIC International Conference on Communications Workshops in China (ICCC Workshops)*. IEEE, 2019, pp. 25–29.
- [126] S. Sakamoto, R. Obukata, T. Oda, L. Barolli, M. Ikeda, y A. Barolli, “Performance analysis of two wireless mesh network architectures by wmn-sa and wmn-ts simulation systems,” *Journal of High Speed Networks*, vol. 23, num. 4, pp. 311–322, 2017.
- [127] A. Barolli, T. Oda, M. Ikeda, K. Matsuo, L. Barolli, y M. Takizawa, “A ga-based simulation system for wmn: Performance analysis for different wmn architectures considering weibull distribution, hwmp and tcp protocols,” in *Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems*. Springer, 2017, pp. 14–23.
- [128] M. A. Filho, M. Ribeiro, C. Celes, A. Santos, C. Oliveira, y R. Braga, “Performance analysis of openflow in a multi-interface wmn testbed,” in *Proceedings of the Euro American Conference on Telematics and Information Systems*, 2018, pp. 1–8.
- [129] L. Baldesi, L. Maccari, y R. L. Cigno, “Optimized cooperative streaming in wireless mesh networks,” *2016 IFIP Networking Conference (IFIP Networking) and Workshops, IFIP Networking 2016*, pp. 350–358, 2016.
- [130] G. Pallis, D. Katsaros, M. D. Dikaiakos, N. Loulloudes, y L. Tassiulas, “On the structure and evolution of vehicular networks,” in *2009 IEEE International Symposium on Modeling, Analysis & Simulation of Computer and Telecommunication Systems*. IEEE, 2009, pp. 1–10.
- [131] R. Zhang, L. Li, C. Bao, L. Zhou, y B. Kong, “The community detection algorithm based on the node clustering coefficient and the edge clustering coefficient,” in *Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation*. IEEE, 2014, pp. 3240–3245.
-



- [132] S. Kosta, A. Mei, y J. Stefa, "Large-scale synthetic social mobile networks with swim," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 13, num. 1, pp. 116–129, 2012.
- [133] "SWIM: Small World In Motion - a mobility model for human movements." [En línea]. Disponible: <http://swim.di.uniroma1.it/{#}downloads>
- [134] A. Munjal, T. Camp, y W. C. Navidi, "Constructing rigorous manet simulation scenarios with realistic mobility," in *2010 European Wireless Conference (EW)*. IEEE, 2010, pp. 817–824.
- [135] "OpenStreetMap." [En línea]. Disponible: <https://www.openstreetmap.org/{#}map=7/-1.783/-78.132>
- [136] "A Study of Mobility Models based on Spatial Node Distribution and Area Coverage," 2017.
- [137] "The Network Simulator - ns-2." [En línea]. Disponible: <https://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [138] Gephi.org. (2019) Gephi 0.9.2. [En línea]. Disponible: <https://gephi.org>
- [139] "MATLAB - MathWorks - MATLAB & Simulink." [En línea]. Disponible: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [140] P. S. Foundation. (2019) Python 3.7.3. [En línea]. Disponible: <https://www.python.org>
- [141] K. A. y P. Boyko, "Ieee 802.11 s mesh networking ns-3 model," *Workshop on ns3*, vol. 43, 2010.
- [142] F. V. Chamba Macas, "Implementación de protocolos de enrutamiento reactivo y proactivos para redes inalámbricas móviles Ad-hoc." *Universidad Católica de Santiago de Guayaquil*, 2017.
- [143] D. C. Montgomery y G. C. Runger, *Applied statistics and probability for engineers*. John Wiley & Sons, 2010.
- [144] Z. Chen, J. Wu, Y. Xia, y X. Zhang, "Robustness of interdependent power grids and communication networks: A complex network perspective," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 65, num. 1, pp. 115–119, 2017.
- [145] G. Paul, T. Tanizawa, S. Havlin, y H. E. Stanley, "Optimization of robustness of complex networks," *The European Physical Journal B*, vol. 38, num. 2, pp. 187–191, 2004.
- [146] G. Paul, S. Sreenivasan, S. Havlin, y H. E. Stanley, "Optimization of network robustness to random breakdowns," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 370, num. 2, pp. 854–862, 2006.
- [147] U. Brandes, "A faster algorithm for betweenness centrality," *Journal of mathematical sociology*, vol. 25, num. 2, pp. 163–177, 2001.
- [148] N. Meghanathan, "A random network model with high clustering coefficient and variation in node degree," in *2015 8th International Conference on Control and Automation (CA)*. IEEE, 2015, pp. 54–57.
- [149] M. Latapy, "Main-memory triangle computations for very large (sparse (power-law)) graphs," *Theoretical computer science*, vol. 407, num. 1-3, pp. 458–473, 2008.