

**IMPACTO DE LA VELOCIDAD Y MODELO DE MOVILIDAD EN UNA
COMUNICACIÓN DE DATOS DE UNA RED VEHICULAR**



**Daniel Felipe Chavarro Piamba
Oscar Arley Orozco Sarasti**

**Director
Ing. Oscar J. Calderón C.**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Línea de Investigación de Gestión Integrada de Redes, Servicios y
Arquitecturas de Telecomunicaciones
Popayán, Mayo de 2013**

IMPACTO DE LA VELOCIDAD Y MODELO DE MOVILIDAD EN UNA COMUNICACIÓN DE DATOS DE UNA RED VEHICULAR



Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones

**Daniel Felipe Chavarro Piamba
Oscar Arley Orozco Sarasti**

**Director
Ing. Oscar J. Calderón C.**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Línea de Investigación de Gestión Integrada de Redes, Servicios y
Arquitecturas de Telecomunicaciones
Popayán, Mayo de 2013**

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1. CAPÍTULO I. REDES VEHICULARES.....	3
1.1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.2. COMPONENTES, DOMINIOS Y ESCENARIOS DE LA RED VANET	4
1.2.1. Componentes	4
1.2.2. Dominios	5
1.2.3. Escenarios de Comunicación	6
1.3. CARACTERÍSTICAS DE UNA RED VEHICULAR	9
1.4. APLICACIONES	10
1.4.1. Aplicaciones de Seguridad	10
1.4.2. Aplicaciones de Eficiencia de Tráfico.....	10
1.4.3. Aplicaciones de Información y Entretenimiento.....	11
1.5. TECNOLOGÍAS Y BANDAS DE FRECUENCIA	12
1.5.1. Tecnologías	12
1.5.2. Bandas de Frecuencia.....	13
1.6. REQUERIMIENTOS Y DESAFÍOS DE LAS REDES VANET	14
1.6.1. Requerimientos	14
1.6.2. Desafíos	14
2. CAPÍTULO II. MODELOS DE MOVILIDAD.....	17
2.1. INTRODUCCIÓN.....	17
2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE MOVILIDAD	18
2.2.1. Modelos Aleatorios	18
2.2.2. Modelos de Tráfico	18
2.2.3. Modelos de Comportamiento	18
2.2.4. Modelos de Flujo	19
2.3. MODELOS DE MOVILIDAD MICROSCÓPICOS EN REDES VANET	23
2.3.1. Modelo de Krauß	23
2.3.2. Modelo de Kerner	23
2.3.3. Modelo de Wagner	24
2.3.4. Modelo de Conducción Inteligente.....	25
2.4. MOVILIDAD VEHICULAR.....	28

2.5.	TIPOS DE SIMULADORES PARA REDES VANET	28
2.5.1.	Simuladores de tráfico vehicular	23
2.5.2.	Simuladores de red.....	23
2.5.3.	Simuladores híbridos	30
2.5.4.	Simuladores VANET.....	30
3.	CAPÍTULO III. SIMULACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS.....	32
3.1.	INTRODUCCIÓN.....	32
3.2.	SELECCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN	32
3.2.1.	Herramientas software para la simulación de tráfico vehicular.....	32
3.2.2.	Herramientas software para la simulación de red	33
3.2.3.	Herramientas software híbridas	33
3.2.4.	Herramientas software VANET	34
3.3.	METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN	37
3.3.1.	Definición de escenarios y casos de simulación	37
3.3.1.1.	Escenario 1: número de usuarios bajo	40
3.3.1.2.	Escenario 2: número de usuarios alto	48
3.3.2.	Definición de las características de los escenarios de simulación.....	44
3.3.2.1.	Área de estudio.....	48
3.3.2.2.	Parámetros técnicos y aplicaciones	48
3.3.3.	Ejecución de las pruebas de simulación	47
3.3.4.	Análisis de resultados.....	47
3.3.4.1.	Impacto del modelo de movilidad	48
3.3.4.2.	Impacto de la velocidad.....	66
4.	CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.	73
4.1.	CONCLUSIONES.....	73
4.1.1.	Respecto a la velocidad y al modelo de movilidad de los nodos.....	73
4.1.2.	Respecto al desarrollo de la simulación.....	73
4.1.3.	Respecto a los resultados de la simulación	74
4.2.	RECOMENDACIONES.....	75
4.3.	TRABAJOS FUTUROS.....	76
	REFERENCIAS.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Dominios y componentes de una red vehicular	6
Figura 1.2	Escenarios de comunicación de una red VANET	8
Figura 1.3	Pila de protocolos en WAVE	13
Figura 2.1	Clasificación de los modelos de movilidad.....	20
Figura 2.2	Mapa conceptual para la generación de un modelo de movilidad.....	21
Figura 2.3	Mapa conceptual adaptado al entorno colombiano.....	22
Figura 2.4	Relación en el funcionamiento de simuladores híbridos.....	30
Figura 2.5	Relación en el funcionamiento de simuladores VANET.....	31
Figura 3.1	Escenarios y casos a simular.....	38
Figura 3.2	Variables del modelo de Krauß.....	38
Figura 3.3	Variables del modelo IDM.....	40
Figura 3.4	Variables del modelo de Kerner Personalizado.....	40
Figura 3.5	Glorieta de Santa Clara, área de simulación.....	44
Figura 3.6	Área de simulación en SUMO.....	45
Figura 3.7	Velocidad de los nodos en estudio, escenario 1 caso 1.....	49
Figura 3.8	Tiempo de ocupación del canal por nodo, escenario 1 caso 1.....	50
Figura 3.9	Paquetes procesados por nodo, escenario 1 caso 1.....	51
Figura 3.10	Velocidad de los nodos en estudio, escenario 1 caso 2.....	53
Figura 3.11	Tiempo de ocupación del canal por nodo, escenario 1 caso 2.....	54
Figura 3.12	Paquetes procesados por nodo, escenario 1 caso 2.....	55
Figura 3.13	Velocidad de los nodos en estudio, escenario 2 caso 1.....	57
Figura 3.14	Tiempo de ocupación del canal por nodo, escenario 2 caso 1.....	58
Figura 3.15	Paquetes procesados por nodo, escenario 2 caso 1.....	59
Figura 3.16	Velocidad de los nodos en estudio, escenario 2 caso 2.....	61
Figura 3.17	Tiempo de ocupación del canal por nodo, escenario 2 caso 2	62
Figura 3.18	Paquetes procesados por nodo, escenario 2 caso 2.....	63
Figura 3.19	Paquetes recibidos y perdidos por modelo de movilidad en cada escenario y caso	65

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Clasificación de las aplicaciones de redes VANET.....	11
Tabla 1.2	Bandas de frecuencia utilizadas en redes VANET.....	13
Tabla 2.1	Parámetros del modelo IDM para varios comportamientos de conductores....	26
Tabla 2.2	Clasificación de los modelos de movilidad.....	28
Tabla 3.1	Tabla comparativa entre simuladores para redes VANET.....	35
Tabla 3.2	Tipos de vehículos soportados por SUMO.....	36
Tabla 3.3	Comportamiento de los nodos según el tipo de vehículo.....	39
Tabla 3.4	Distribución de vehículos en el escenario 1.....	41
Tabla 3.5	Distribución de vehículos en el escenario 2.....	41
Tabla 3.6	Relación entre velocidades para IDM.....	42
Tabla 3.7	Velocidades adaptadas para IDM (caso 1).....	43
Tabla 3.8	Velocidades adaptadas para IDM (caso 2).....	43
Tabla 3.9	Características de las aplicaciones simuladas.....	46
Tabla 3.10	Características y parámetros técnicos de los escenarios y casos.....	47
Tabla 3.11	Valores de PER por nodo, escenario 1 caso 1.....	52
Tabla 3.12	Valores de PER por nodo, escenario 1 caso 2.....	56
Tabla 3.13	Valores de PER por nodo, escenario 2 caso 1.....	60
Tabla 3.14	Valores de PER por nodo, escenario 2 caso 2.....	64
Tabla 3.15	Valores de PER para los escenarios y casos simulados.....	65
Tabla 3.16	Paquetes recibidos y perdidos por instante, escenario 1 caso 1.....	67
Tabla 3.17	Paquetes recibidos y perdidos por instante, escenario 1 caso 2.....	68
Tabla 3.18	Paquetes recibidos y perdidos por instante, escenario 2 caso 1.....	69
Tabla 3.19	Paquetes recibidos y perdidos por instante, escenario 2 caso 2.....	70
Tabla 3.20	Variables que afectan las comunicaciones en redes VANET.....	72

LISTA DE ACRÓNIMOS

ARIB	<i>Association of Radio Industries and Businesses</i> , Asociación de Industrias de Radio y Negocios.
AU	<i>Application Unit</i> , Unidad de Aplicación.
C2C	<i>Car To Car</i> , Carro a Carro.

C2C-CC	<i>Car To Car Communication Consortium</i> , Consorcio de Comunicaciones Carro a Carro.
CEN	<i>Comité Européen de Normalisation, European Committee for Standardization</i> , Comité Europeo para Estandarización.
CSM	<i>Constant Speed Model</i> , Modelo de Velocidad Constante.
DIV	<i>Direct In Vehicle</i> , Directo en el Vehículo.
DOT	<i>Department of Transportation</i> , Departamento de Transporte.
DSRC	<i>Dedicated Short Range Communications</i> , Comunicaciones Dedicadas de Corto Alcance.
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i> , Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones.
FCC	<i>Federal Communications Commission</i> , Comisión Federal de Comunicaciones.
FTM	<i>Fluid Traffic Model</i> , Modelo de Tráfico Fluido.
GPS	<i>Global Positioning System</i> , Sistema de Posicionamiento Global.
GUI	<i>Graphical User Interface</i> , Interfaz Gráfica de Usuario.
IDM	<i>Intelligent Driving Model</i> , Modelo de Conducción Inteligente.
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> , Entorno de Desarrollo Integrado.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
ITS	<i>Intelligent Transportation Systems</i> , Sistemas de Transporte Inteligente.
ITU	<i>International Telecommunication Union</i> , Unión Internacional de Telecomunicaciones.
IVC	<i>Inter-Vehicle Communication</i> , Comunicación Entre Vehículos.
MANET	<i>Mobile Ad hoc NETWORK</i> , Red Móvil Ad Hoc.
MOVE	<i>MObility model generator for VEhicular networks</i> , Generador de Modelo de Movilidad para Redes Vehiculares.

NCTUns	<i>National Chiao Tung University network simulator</i> , Simulador de Red de la Universidad Nacional Chiao Tung.
NGN	<i>Next-Generation Networks</i> , Redes de Nueva Generación.
OBU	<i>On Board Unit</i> , Unidad a Bordo.
P2P	<i>Peer to Peer</i> , De Igual a Igual.
PER	<i>Packet Error Rate</i> , Tasa de Error de Paquetes.
PoE	<i>Power over Ethernet</i> , Potencia sobre Ethernet.
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> , Modulación en Cuadratura por Desplazamiento de Fase.
RITA	<i>Research and Innovative Technology Administration</i> , Administración de Investigación y Tecnologías Innovadoras.
RSU	<i>Road-Side Unit</i> , Unidad al lado de la Carretera.
RTM	<i>Random Trip Model</i> , Modelo de Viajes Aleatorios.
SUMO	<i>Simulation of Urban MObility</i> , Simulación de Movilidad Urbana.
SSM	<i>Stop Sign Model</i> , Modelo de Señales de Pare.
V2G	<i>Vehicle to Grid</i> , Vehículo a Red.
V2H	<i>Vehicle to Home</i> , Vehículo a Hogar.
V2P	<i>Vehicle to Pedestrian</i> , Vehículo a Peatón.
V2R	<i>Vehicle to Road</i> , Vehículo a Carretera.
V2V	<i>Vehicle to Vehicle</i> , Vehículo a Vehículo.
VANET	<i>Vehicular Ad hoc NETWORK</i> , Red Vehicular Ad Hoc.
VeINS	<i>Vehicles In Network Simulation</i> , Vehículos en Simulación de Red.
WAVE	<i>Wireless Access in Vehicular Environments</i> , Acceso Inalámbrico en Ambientes Vehiculares.
WSMP	<i>Wave Short Message Protocol</i> , Protocolo de Mensajes de Onda Corta.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las redes inalámbricas han evolucionado en su desarrollo con el fin de soportar nuevos servicios y optimizar el rendimiento de servicios tradicionales para los usuarios finales. Bajo este contexto, uno de los nuevos tópicos de mayor interés científico es el de la comunicación en redes vehiculares, el cual hace referencia a la interconexión de vehículos entre sí y entre éstos y la infraestructura fija o infoestaciones¹, con el fin de brindar conectividad a los conductores.

Las redes vehiculares son una clase de redes inalámbricas de corto y mediano alcance que han surgido gracias a los avances en tecnologías inalámbricas y a la industria automotriz. Se conocen como Redes Vehiculares *Ad Hoc* (VANET: *Vehicular Ad hoc NETWORKS*) y se forman espontáneamente entre vehículos en movimiento que están equipados con interfaces inalámbricas. La red VANET también se forma entre vehículos e infraestructura fija. Su desarrollo ha sido impulsado por la creciente necesidad de mejorar la seguridad vial, por la demanda de los usuarios para acceder a servicios de comunicaciones desde sus vehículos y por la carencia de comunicaciones ubicuas centradas en los vehículos [1].

Las redes VANET son una especialización de las Redes Móviles *Ad Hoc* (MANET: *Mobile Ad hoc NETWORKS*) que facilitan el intercambio de datos entre usuarios al momento de conducir. Se diferencian de las MANET en que los nodos (vehículos) están restringidos a moverse únicamente a lo largo y ancho de las vías [2]. Esta restricción en la movilidad de los vehículos hace que los protocolos y métodos de evaluación de desempeño de redes MANET no sean adecuados para redes vehiculares.

Uno de los problemas más notorios que se presentan en redes VANET es el no poder modelarlas con una topología fija debido a la aleatoriedad con que se mueven los vehículos sobre las carreteras. Por consiguiente, este dinamismo de los nodos puede conllevar a la pérdida de paquetes y del enlace en una comunicación [3].

Por otra parte, las redes VANET presentan características especiales en aspectos como *throughput*, confiabilidad, velocidad de los nodos y utilización de ancho de banda, en comparación con otras redes inalámbricas. Básicamente las VANET deben proveer comunicaciones altamente fiables, de baja latencia y con elevada capacidad de enrutamiento que soporten aplicaciones con diversas tasas de datos [4].

Con el fin de cumplir con los requerimientos señalados y afrontar las características especiales de las redes VANET, han surgido investigaciones que buscan modelar ambientes vehiculares para facilitar la simulación de los mismos; como resultado se han desarrollado modelos de movilidad² adaptados a dichos ambientes, los cuales tratan de predecir el comportamiento de los nodos en las carreteras con el fin de aumentar el realismo de las simulaciones y cuantificar mejor los resultados que se obtengan [5].

¹ Las infoestaciones son elementos ubicados al lado de las carreteras con el fin de brindar comunicaciones bidireccionales entre éstas y los vehículos.

² Modelo de movilidad hace referencia al patrón de movimiento de los vehículos en las vías, junto con otras características del entorno.

A partir de lo anterior, este trabajo de grado realiza mediante simulación un análisis del impacto de la velocidad y del modelo de movilidad en una comunicación de datos de una red vehicular, con el fin de determinar cómo la variación de dichos parámetros afecta a una comunicación en una VANET.

Este documento se divide en cuatro capítulos estructurados de la siguiente manera:

Capítulo I. Introduce los conceptos fundamentales relacionados con las redes vehiculares *ad hoc*.

Capítulo II. Presenta los aspectos más relevantes de los modelos de movilidad utilizados en redes VANET y su relación con la velocidad de los nodos, además de los ambientes de simulación para redes vehiculares.

Capítulo III. Describe generalmente las herramientas software disponibles para simular redes VANET y se enfatiza en las seleccionadas para la simulación de escenarios, además presenta los escenarios de red a simular y sus características, se especifican y describen las pruebas, los parámetros a evaluar, los resultados obtenidos y su análisis.

Capítulo IV. Se exponen las conclusiones y recomendaciones obtenidas del desarrollo de todo el proyecto y se presentan una serie de ideas para futuros trabajos e investigaciones en este campo.

1. CAPÍTULO I. REDES VEHICULARES

1.1. INTRODUCCIÓN

El interés en las redes vehiculares ha aumentado considerablemente en los últimos años debido al potencial impacto que puedan llegar tener en la sociedad actual. Con el uso de las redes VANET, los usuarios se benefician de innovadoras aplicaciones que mejoran la seguridad en las vías y brindan ventajas relacionadas principalmente con movilidad, conectividad y prevención.

El constante aumento en el número de vehículos vendidos a nivel global, junto con las posibles consecuencias negativas que esto pueda acarrear (como incrementos en el número de accidentes y aumento de congestión vehicular), impulsaron el diseño y desarrollo de las redes VANET. Los primeros estudios de tráfico se remontan a los años 70 [6-8] y su propósito era caracterizar los escenarios vehiculares por medio de ecuaciones matemáticas. Dichos estudios, junto a los avances en la electrónica, sentaron las bases para el surgimiento de las redes VANET y permitieron dar un paso adelante al adecuar los datos teóricos a simuladores computacionales.

Paralelamente a los estudios de tráfico, surgió en Estados Unidos un proyecto llamado Sistemas de Transporte Inteligente (ITS: *Intelligent Transportation Systems*) con el fin de mejorar la productividad de dicho país a través de la integración de tecnologías avanzadas de comunicación en la infraestructura de transporte y vehículos. Actualmente el proyecto ITS pertenece a la Administración de Investigación y Tecnologías Innovadoras (RITA: *Research and Innovative Technology Administration*), una entidad gubernamental norteamericana que coordina los programas de investigación del Departamento de Transporte (DOT: *Department of Transportation*) [9,10].

Las redes VANET se consideran como soporte básico para la convergencia de servicios de comunicaciones en ambientes vehiculares y como solución prometedora a diversas aplicaciones de los ITS [11,12].

Una red vehicular *ad hoc* se define como un conjunto de vehículos e infoestaciones interconectados inalámbricamente y espontáneamente con el fin de mejorar la experiencia de los usuarios al conducir, aumentar la seguridad en las vías e incrementar la conectividad de los conductores [1,13-15]. Generalmente dichas infoestaciones se encuentran en sitios altos para obtener un mayor ángulo de visión.

Al considerarse como componentes básicos para los servicios y aplicaciones proporcionadas por los ITS, las VANET deben ser capaces de establecer enlaces inalámbricos fiables con el fin de proveer monitoreo continuo y “feed-back”³ en tiempo real a los usuarios.

Desde el punto de vista aplicativo, se espera que una VANET aborde tanto los aspectos de seguridad en las vías como los aspectos de entretenimiento e información que requieran los usuarios al momento de conducir sus vehículos [16].

³ *Feed-back* (Retroalimentación), es el proceso mediante el cual un receptor manifiesta reacciones o respuestas respecto a la actuación de un transmisor cuando se realiza un intercambio de datos e información.

Sin duda alguna, las principales aplicaciones de las redes VANET se encuentran en el escenario de seguridad vial, ya que éstas permiten optimizar las políticas de prevención de accidentes de tránsito, contribuyendo así a mejorar la calidad de vida de los usuarios [4,17].

Debido al enfoque de este proyecto, se presenta una descripción general de las redes vehiculares *ad hoc*, sus características, aplicaciones, tecnologías, bandas de frecuencia, requerimientos y desafíos para lograr un análisis más profundo del comportamiento de los vehículos y cómo la variación de parámetros específicos puede llegar a afectar una comunicación dentro de una red vehicular.

1.2. COMPONENTES, DOMINIOS Y ESCENARIOS DE LA RED VANET

Las redes vehiculares poseen diversos componentes necesarios para su correcto funcionamiento y operación, por ello es necesario describirlos de manera general y conocer los tipos de comunicaciones que se dan en una red VANET.

1.2.1. Componentes

Una red VANET está compuesta por dispositivos que poseen características que definen su funcionalidad e interacción en la red. En términos generales, una red vehicular *ad hoc* está conformada por dos tipos de dispositivos:

- **Nodo (Vehículo):** en las redes VANET, los nodos son vehículos que circulan por las carreteras, dentro de éstos se encuentran los componentes que hacen posible la comunicación, los cuales se describen a continuación [1,18-20]:
 - Unidad a Bordo (OBU: *On Board Unit*): es la encargada de la comunicación entre vehículos e infoestaciones. Maneja los protocolos de enrutamiento y acceso del nodo, hace posible la transmisión inalámbrica y gestiona los dispositivos de aplicación del usuario.
 - Unidad de Aplicación (AU: *Application Unit*): hace referencia a los dispositivos que muestran información al usuario. Generalmente se les denomina AU a dispositivos como *laptops*, *smartphones*, PDAs o pantallas ubicadas dentro del nodo y que se encuentran conectados a la OBU.

Generalmente, un nodo en una red VANET está conformado por una OBU y varias AU [20]. Asimismo, cualquier nodo tiene como objetivo establecer una comunicación inalámbrica para el intercambio de datos, entre ellos mismos o entre las infoestaciones, las cuales hacen referencia a *hotspots* Wi-Fi® y a la Unidad al lado de la Carretera (RSU: *Road-Side Unit*).

- **Road-Side Unit (RSU)**⁴: es una entidad encargada de gestionar las conexiones entre los nodos para establecer comunicaciones bidireccionales entre ellos. También actúa como pasarela o *gateway* para proveer acceso a Internet a los vehículos [21].

En una red VANET pueden existir varias RSU a lo largo de una carretera con el fin de evitar congestiones en las comunicaciones. Su funcionamiento se basa en redes de acceso cableadas que soportan la transmisión de datos en la red vehicular. Si la implementación de RSUs no es posible, diversos autores [22-25] proponen que *hotspots* basados en Wi-Fi[®] cumplan las funciones de las RSU.

1.2.2. Dominios

Un dominio en una red VANET hace referencia a un conjunto de elementos lógicos y físicos que operan colectivamente con el fin de establecer comunicaciones entre nodos y RSUs. Los nodos, sus componentes y las RSU de una red vehicular conforman diversos dominios que se clasifican de acuerdo a su funcionamiento en [4,19,26]:

- ❖ **Dominio en el Vehículo (*In-Vehicle Domain*)**: conformado por la OBU y las AU del nodo; forman una red de comunicación bidireccional dentro del vehículo y éstos elementos pueden conectarse alámbrica o inalámbricamente. Para la comunicación inalámbrica pueden utilizar tecnologías de corto alcance como Bluetooth[®] o Zig-Bee[®].
- ❖ **Dominio Ad Hoc (*Ad Hoc Domain*)**: este dominio hace referencia a la comunicación inalámbrica utilizada para enlazar los nodos entre sí o los nodos con las RSU. El estándar utilizado para realizar dicha comunicación es el presentado por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) denominado IEEE 802.11p, junto con sus variantes específicas para seguridad, *networking*, gestión de recursos y operaciones multicanal.
- ❖ **Dominio de Infraestructura (*Infrastructure Domain*)**: formado por las redes de acceso y la infraestructura cableada que soporta el acceso a Internet que solicitan los nodos y/o las RSU. Aunque, formalmente, no hacen parte de una red vehicular, son un soporte importante para la conectividad de los nodos en movimiento.

Los componentes y dominios descritos anteriormente se muestran en la Figura 1.1. Además de los *hotspots* inalámbricos equipados con tecnología Wi-Fi[®], se ha sugerido que las RSU sean capaces de utilizar tecnologías como WiMAX, 3G o 4G con el fin de aumentar la cobertura de las redes vehiculares.

⁴ RSU es la denominación más generalizada para los elementos que no utilizan tecnología Wi-Fi[®].

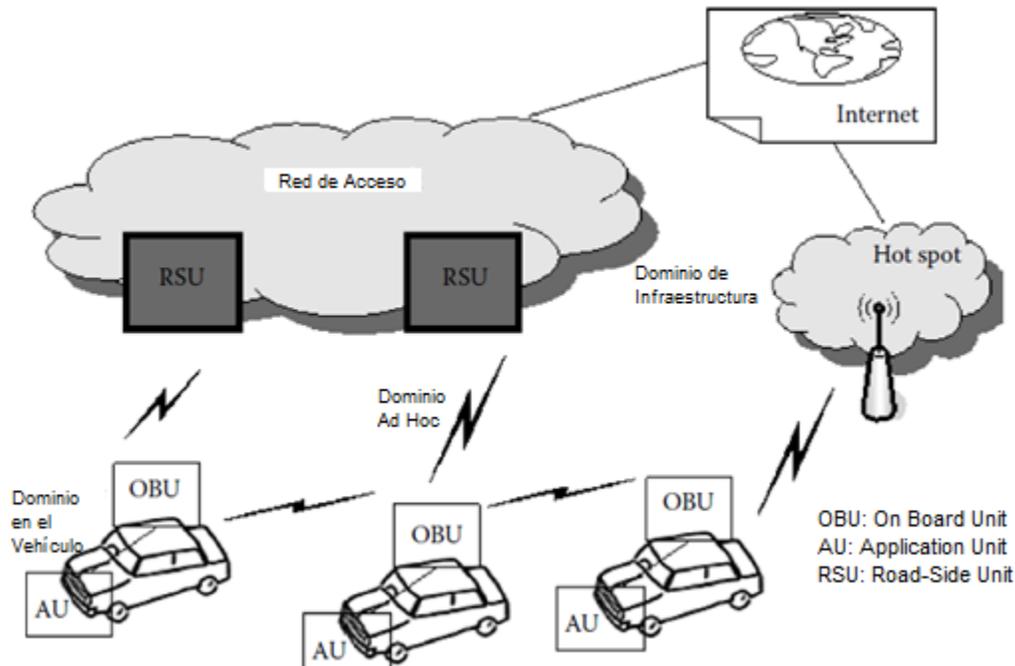


Figura 1.1 Dominios y componentes de una red vehicular. Adaptada de [26].

1.2.3. Escenarios de Comunicación

En las redes vehiculares, un escenario de comunicación es una clasificación dada a las distintas maneras en que los nodos pueden comunicarse. Un aspecto clave de dicha comunicación en las redes VANET es la conexión entre OBUs y RSUs, o entre OBUs de diferentes vehículos. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU: *International Telecommunication Union*) utiliza la letra V de vehículo para referirse a sus escenarios, mientras que el Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones (ETSI: *European Telecommunications Standards Institute*) utiliza en su notación la letra C de carro.

Se han planteado diversos escenarios para establecer comunicaciones en una red vehicular, los cuales se describen a continuación [1, 20,21,26-30]:

- ⊕ **Vehículo a Vehículo (V2V: *Vehicle to Vehicle*):** se refiere a la comunicación directa o basada en multi-saltos entre vehículos en una red VANET, se da entre las OBU de los vehículos y presenta dos denominaciones más: Comunicación Entre Vehículos (IVC: *Inter-Vehicle Communication*) y Carro a Carro (C2C: *Car to Car*); esta última dada por el Consorcio de Comunicaciones Carro a Carro (C2C-CC: *Car To Car Communication Consortium*)⁵, siendo la más relevante y mencionada por la literatura la denominación V2V.

⁵ El consorcio C2C-CC es un proyecto de cooperación de empresas manufactureras de vehículos, partes y repuestos europeos que busca establecer estándares para comunicaciones vehiculares junto con la ETSI.

- ⊕ **Vehículo a Infraestructura (V2I: *Vehicle to Infrastructure*):** el escenario de comunicación V2I hace referencia a la conexión existente entre los vehículos y la infraestructura a lo largo de la carretera, esta comunicación se da entre las OBU de los nodos y la infraestructura. Por infraestructura se entiende a las infoestaciones descritas anteriormente (RSUs y *hotspots*). Otra denominación que presenta este escenario es Vehículo a Carretera (V2R: *Vehicle to Road*).
- ⊕ **Vehículo a Peatón (V2P: *Vehicle to Pedestrian*):** hace referencia a la comunicación entre los nodos de una red VANET y los peatones que circulan por las calles. Este escenario presenta retos adicionales a los escenarios V2V y V2I, ya que los movimientos de los peatones son, a menudo, menos predecibles⁶ que los de los vehículos.
- ⊕ **Directo en el Vehículo (DIV: *Direct In Vehicle*):** la comunicación DIV es poco referenciada por la literatura y se da cuando dos o más AU en el mismo vehículo intercambian información entre ellas. Puesto que las principales aplicaciones de una red VANET se basan en escenarios de comunicación V2V y V2I, el escenario DIV es poco utilizado al momento de simular redes vehiculares.
- ⊕ **Vehículo a Hogar (V2H: *Vehicle to Home*):** escenario propuesto por la ITU para la convergencia de Redes de Nueva Generación (NGN: *Next Generation Networks*) con redes VANET. Hace referencia a la comunicación entre un nodo de una red vehicular con un nodo de una red fija en el hogar a través de una infraestructura de red NGN. Este escenario probablemente será relevante en un futuro cercano, cuando los “hogares inteligentes” sean una realidad.
- ⊕ **Vehículo a Red Eléctrica (V2G: *Vehicle to Grid*):** del mismo modo que el escenario V2H, es definido por la ITU y se refiere a la comunicación entre un nodo de una red VANET con redes de energía eléctrica (*utility grids*) a través de adaptadores Ethernet (PoE: *Power over Ethernet*) y Comunicaciones Dedicadas de Corto Alcance (DSRC: *Dedicated Short Range Communications*).

Debido a la aceptación por parte de la ITU de los escenarios V2V y V2I, éstos son los más referenciados por la literatura. Sin embargo, no abarcan todas las posibles maneras de comunicación, por lo que los escenarios restantes son relevantes al momento de trabajar con redes VANET dependiendo de las necesidades particulares. La Figura 1.2 muestra un esquema de dichos escenarios.

⁶ “Predecibles” en el sentido de conocer de antemano por donde pueden circular los vehículos, mientras que los peatones presentan movimientos más aleatorios.

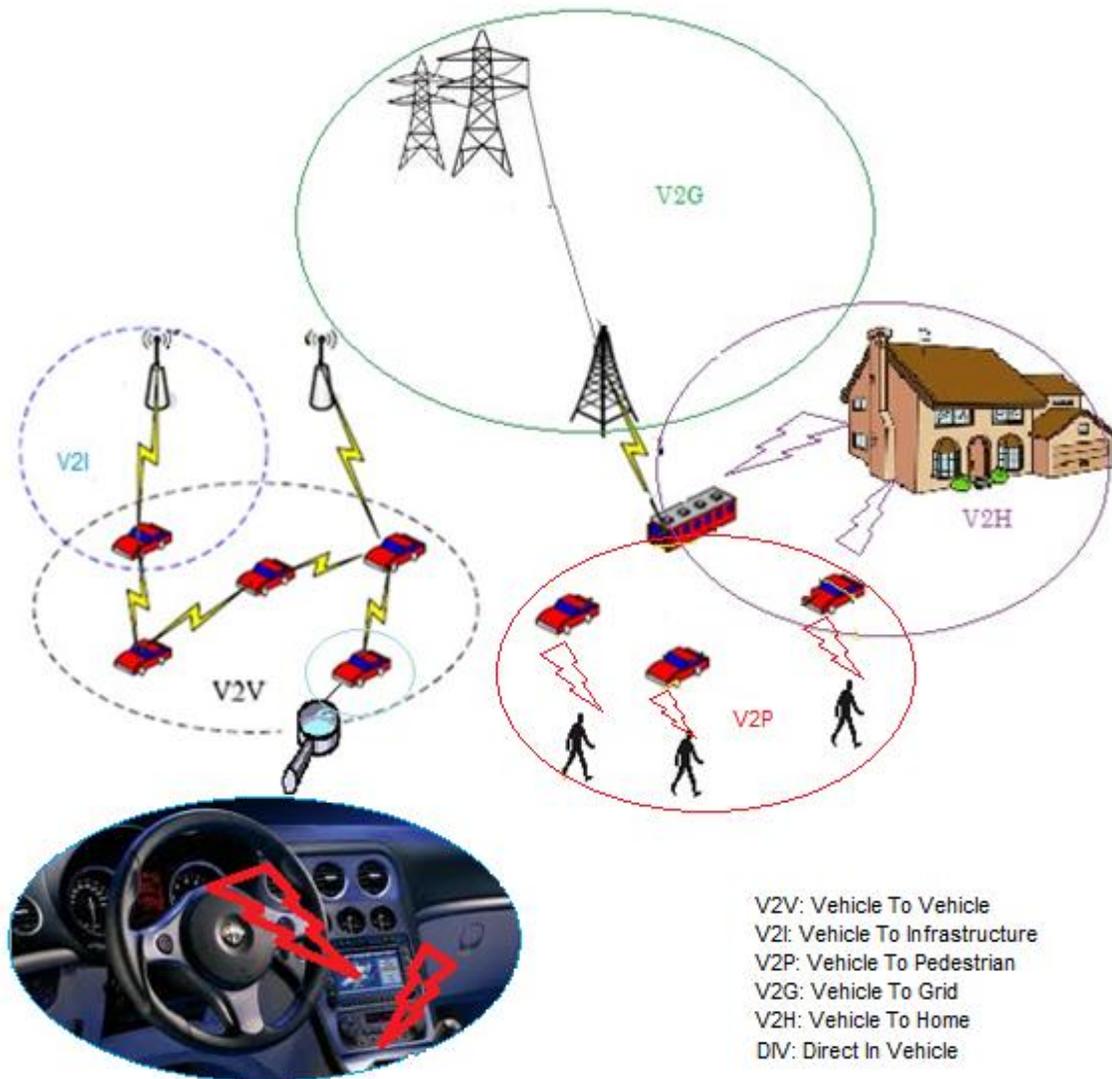


Figura 1.2 Escenarios de comunicación de una red VANET. Por los Autores.

Con los escenarios de comunicación, dominios y componentes descritos, se ha presentado la operación general de una red vehicular *ad hoc*, en donde los nodos, RSUs y demás elementos operan conjuntamente para lograr establecer comunicaciones V2V o V2I. Sin embargo, por su naturaleza intrínseca *ad hoc*⁷, las redes VANET presentan características especiales, como se describe a continuación.

⁷ “*Ad hoc*” es una frase en latín que significa literalmente “para esto”. En networking y redes, el término se utiliza para expresar que no hay nodos centrales ni priorizados en las redes.

1.3. CARACTERÍSTICAS DE UNA RED VEHICULAR

Una red vehicular presenta diversas características que la diferencian notoriamente de otras redes inalámbricas. Se destacan las siguientes [1,4,31-36]:

- **Topología altamente dinámica:** como se dijo anteriormente, describir una topología específica para una red VANET es particularmente exigente debido a la misma naturaleza de los vehículos. Los nodos están en constante movimiento y una comunicación V2I o V2V puede darse en muy poco tiempo, dificultando la identificación de una topología para éstas redes.
- **Alta movilidad de los nodos:** el movimiento de los vehículos en las carreteras, de cierta forma, puede llegar a ser predicho⁸ debido a que éstos se encuentran restringidos a moverse a lo largo y ancho de la carretera; ahora bien, los cambios de velocidad, aceleración y dirección del movimiento hacen que la movilidad de los nodos en una red vehicular sea elevada.
- **Nodos con velocidades independientes o correlacionadas:** los nodos en una red vehicular pueden tener velocidades independientes el uno del otro (en una autopista) o su velocidad puede llegar a depender de los otros vehículos (en una intersección/cruce), por lo que la caracterización y simulación de estos escenarios varía.
- **Canales variables en tiempo y frecuencia:** debido a la velocidad de los vehículos, a los ambientes donde circulen y a los posibles obstáculos para la señal inalámbrica (e.g. edificios, árboles, etc.) la comunicación puede sufrir desvanecimientos en tiempo o frecuencia con mayor intensidad que otras redes móviles.
- **Potencia de transmisión “ilimitada”:** las limitaciones de potencia a menudo asociadas con dispositivos en redes móviles y redes de sensores no es usualmente una limitación en redes VANET, puesto que los vehículos pueden proveer potencia continuamente a los dispositivos de comunicación y de usuario (OBU y AU respectivamente) a través de las baterías en los vehículos.
- **Alta capacidad computacional:** las OBU en los nodos deben manejar, dependiendo de la aplicación, elevados flujos de tráfico de red con baja prioridad (en un *streaming* de video) o bajas tasas de datos con alta prioridad (aplicaciones de seguridad). Además controlan el enrutamiento y la conexión con las RSU, por lo que los dispositivos requieren capacidad computacional para realizar dichas tareas simultáneamente y sin latencias (en especial en aplicaciones críticas).

⁸ Predecir “de cierta forma” el movimiento de los nodos hace referencia a conocer de antemano el recorrido de dichos nodos (por ejemplo en una autopista o carretera recta donde no haya posibilidad de cambiar de dirección).

- **Potencialmente de gran escala:** aunque para que exista una comunicación en una red vehicular se requiere, como mínimo, un par de nodos, vale la pena señalar que en un escenario específico la red puede crecer desmesuradamente (en una intersección, semáforo o embotellamiento). Este aumento en el número de vehículos afecta significativamente los procesos de comunicación en la red VANET.

Las características descritas anteriormente pueden llegar a afectar positiva o negativamente una comunicación en una red vehicular. Lo anterior depende de las aplicaciones específicas para las cuales se esté implementando la red VANET.

1.4. APLICACIONES

Las principales aplicaciones de las redes vehiculares se relacionan con procesos de seguridad en las vías, eficiencia de tráfico e información y entretenimiento⁹, los cuales se describen a continuación [1,12-17,31,37-42].

1.4.1. Aplicaciones de Seguridad

Tienen como función monitorear y recolectar continuamente información acerca del estado de las vías con el fin de prevenir accidentes y percances. Son el soporte primordial para el estudio y evaluación de técnicas y procedimientos a implementar en redes vehiculares.

Este tipo de aplicaciones pueden operar conjuntamente con los ITS para disminuir las elevadas cifras de accidentes de tránsito presentadas cada año¹⁰ y así, hacer de las carreteras un lugar más seguro.

Las aplicaciones de seguridad ofrecen un gran beneficio tanto para los gobiernos como para los ciudadanos, puesto que las personas perciben una notable mejoría en la seguridad vial al tener mecanismos de soporte que informen sobre incidentes en las vías. Además, contar con un esquema de información que ayude a reducir accidentes y a mejorar la movilidad, ofrece a los gobiernos estadísticas favorables y descenso en daños colaterales, mejorando la calidad de vida de las personas.

1.4.2. Aplicaciones de Eficiencia de Tráfico

Las aplicaciones de eficiencia de tráfico tienen como objetivo general optimizar la movilidad de los vehículos sobre las carreteras. Abarcan desde sistemas electrónicos de peaje hasta alarmas de velocidad, e introducen mecanismos de soporte a las autoridades encargadas de vigilar el estado de las vías.

Cabe destacar que no están optimizadas para informar acerca de accidentes, lo que las hace diferentes a las aplicaciones de seguridad.

⁹ También llamadas “*Infotainment*” por la contracción de las dos palabras en Inglés (*Information + Entertainment*)

¹⁰ Sólo en Colombia hubo más de 40000 accidentes de tránsito en 2011, causando casi 5800 fallecimientos (según la Contraloría General de la República).

1.4.3. Aplicaciones de Información y Entretenimiento

Por último pero no menos importante están las aplicaciones dedicadas a información y entretenimiento. Se destacan primordialmente por ser las encargadas de brindar los servicios básicos de una red móvil hacia sus usuarios: acceso a Internet, servicios multimedia, servicios P2P (*peer-to-peer*), entre otros. Además son un complemento para los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS: *Global Positioning Systems*) al momento de brindar rutas y vías para los usuarios. La necesidad de comunicación por parte de las personas hizo que este tipo de aplicaciones se incluyeran en las brindadas por las redes VANET.

Una clasificación detallada de las principales aplicaciones de las redes vehiculares se muestra en la Tabla 1.1.

APLICACIONES DE REDES VANET		
APLICACIONES DE SEGURIDAD	APLICACIONES DE INFORMACIÓN Y ENTRETENIMIENTO	APLICACIONES DE EFICIENCIA DE TRÁFICO
ALERTA POR CURVA PELIGROSA/PUENTE ANGOSTO	ACCESO A INTERNET	SISTEMAS DE PEAJE ELECTRÓNICO
ALARMAS POR VIOLACIÓN DE SEMÁFOROS	APLICACIONES P2P	PAGO ELECTRÓNICO DE GASOLINA
ALERTAS POR PELIGROS CLIMÁTICOS	SERVICIOS MULTIMEDIA	PLACAS/LICENCIAS DE CONDUCCIÓN ELECTRÓNICAS
ALARMAS POR ZONAS DE BAJA VISIBILIDAD	SERVICIOS DE UBICACIÓN	REDUCCIÓN COOPERATIVA DE REFLEJOS DE LUZ
ALERTAS POR PELIGROS EN PUNTOS CIEGOS	MENSAJERÍA INSTANTÁNEA	NAVEGACIÓN Y GUÍAS OPTIMIZADAS
CONTROL INTELIGENTE DE FLUJO DE TRÁFICO	NOTIFICACIÓN DE PUNTOS DE INTERÉS	ASISTENTE LIMITADOR DE VELOCIDAD
ALERTAS POR NODOS EN SENTIDO CONTRARIO	COMUNICACIÓN CON OTROS NODOS	LOG DIARIO DE VEHÍCULOS
ALERTAS POR ACCIDENTES DE TRÁNSITO (SUCEDIDOS Y POR SUCEDER)	LOCALIZADOR DE PARQUEADEROS	PAGO ELECTRÓNICO DE PARQUEADEROS
ALARMAS POR CONDUCCIÓN AGRESIVA	MONITOREO DE VEHÍCULOS ROBADOS	

Tabla 1.1 Clasificación de las aplicaciones de redes VANET. Por los Autores.

Una red vehicular y sus componentes deben estar en capacidad de soportar simultáneamente la información generada por los diferentes tipos de aplicaciones, así como también de clasificarla jerárquicamente y asignar recursos del espectro de frecuencias para asegurar los requerimientos de calidad que se necesiten para cada aplicación específica.

1.5. TECNOLOGÍAS Y BANDAS DE FRECUENCIA

Las redes vehiculares basan su funcionamiento en dos tecnologías inalámbricas junto con sus correspondientes estándares y protocolos. Además, las bandas de frecuencia en las que operan las comunicaciones inalámbricas en redes VANET varían dependiendo del organismo de regulación y del país. Se presenta una descripción de las tecnologías y las bandas de frecuencia utilizadas por redes vehiculares.

1.5.1. Tecnologías

Teniendo en cuenta que las redes vehiculares presentan características especiales en comparación con otras redes móviles, se han formulado soluciones para las 7 capas del modelo de referencia OSI que hagan posible la comunicación entre vehículos. De este modo, las tecnologías utilizadas en redes VANET son [43-46]:

- ④ **Comunicaciones Dedicadas de Corto Alcance (DSRC: *Dedicated Short Range Communications*):** hace referencia a una banda de frecuencias y canales propios de comunicaciones inalámbricas de corto/mediano alcance que permite altas tasas de transmisión de datos. En Estados Unidos, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC: *Federal Communications Commission*) asignó en 1999 las comunicaciones DSRC en la banda de 5.9 GHz, con un ancho de banda de 75 MHz exclusivo para comunicaciones V2V y V2I; esto con el fin de “incrementar la seguridad al viajar, reducir el consumo de gasolina y polución, y continuar con el avance económico de la nación” [47].

En otras partes del planeta también se han asignado porciones del espectro a comunicaciones V2V y V2I. Así, en Japón la Asociación de Industrias de Radio y Negocios (ARIB: *Association of Radio Industries and Businesses*) mediante el estándar STD-T75 y en Europa el Comité Europeo para Estandarización (CEN: *European Committee for Standardization*)¹¹ han estandarizado frecuencias y canales para su uso en redes VANET.

- ④ **Acceso Inalámbrico en Ambientes Vehiculares (WAVE: *Wireless Access in Vehicular Environments*):** WAVE es la denominación dada por la IEEE a un conjunto de protocolos que permiten la comunicación en una red vehicular y especifican todas las capas del modelo de referencia OSI. Definido en 2010, el estándar IEEE 802.11p (encargado de la capa física y de la capa MAC) se basa en DSRC y define un conjunto de protocolos llamados IEEE 1609 para las capas restantes. El objetivo del estándar 802.11p es “brindar conexión inalámbrica en ambientes de alta velocidad y rápidamente cambiantes relacionados con vehículos y camiones” [48].

La Figura 1.3 muestra la pila de protocolos WAVE y los diferentes estándares que forman parte de ésta.

¹¹ La sigla CEN significa literalmente “Comité Européen de Normalisation” y está escrita en francés.

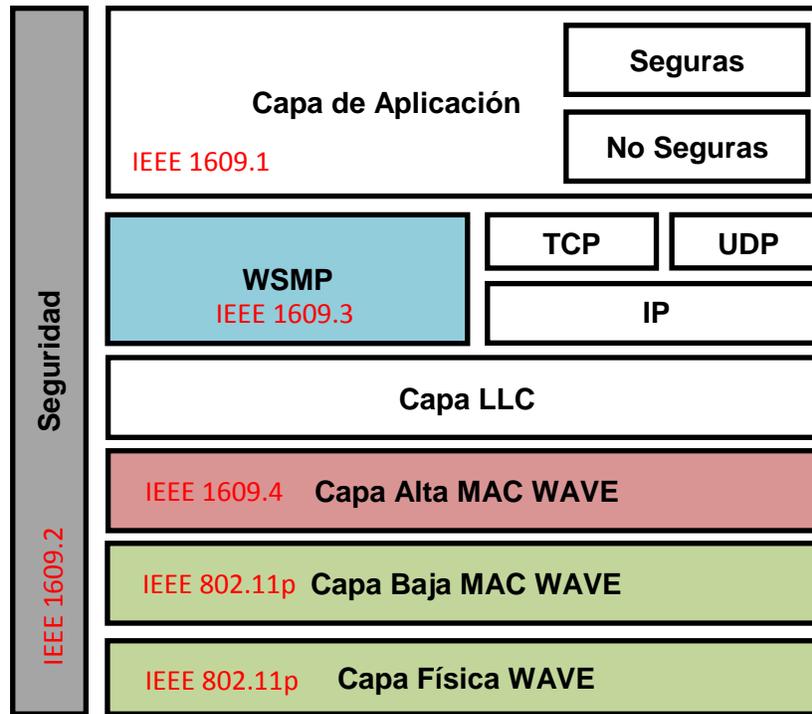


Figura 1.3. Pila de protocolos en WAVE. Adaptada de [49].

1.5.2. Bandas de Frecuencia

En el desarrollo de las redes VANET, los organismos de regulación tomaron la porción del espectro radioeléctrico ubicada en 5.9 GHz para comunicaciones vehiculares, aunque con pequeñas variaciones dependiendo del país donde se apliquen. Las bandas habilitadas para las VANET, el estándar, los países donde se usa y el organismo de estandarización se muestran en la Tabla 1.2.

ESTÁNDAR	RANGO DE FRECUENCIAS (GHz)	USO	ORGANISMO DE ESTANDARIZACIÓN
STD-T75	5.770-5.850	Japón	ARIB
DSRC	5.855-5.925	USA	FCC
	5.855-5.925	Europa	CEN

Tabla 1.2. Bandas de frecuencia utilizadas en redes VANET. Por los Autores.

Cabe destacar que, aunque el rango de frecuencias utilizado en Estados Unidos y en Europa es el mismo, la disposición de los canales varía entre una banda y la otra debido a las diferentes regulaciones en materia de potencia y *throughput* de la Unión Europea.

Las tecnologías descritas anteriormente han surgido para hacer posible la comunicación entre vehículos y cuentan con el respaldo de la comunidad científica y académica. Además, las bandas de frecuencia han sido asignadas por organismos de regulación para evitar posibles interferencias electromagnéticas. No obstante, las VANET presentan nuevos desafíos y requieren de diversos elementos y funcionalidades que otras redes no necesitan, por lo que vale la pena señalar qué puede afectar la implementación de éstas.

1.6. REQUERIMIENTOS Y DESAFÍOS DE LAS REDES VANET

Debido a las características particulares de las redes vehiculares, éstas presentan requerimientos y desafíos adicionales a los encontrados en otras redes móviles. Para que el diseño y desarrollo de redes VANET sea adecuado, deben considerarse los siguientes requerimientos y desafíos.

1.6.1. Requerimientos

Para que las potenciales aplicaciones de las redes vehiculares sean una realidad y se cumplan los objetivos por los cuales surgieron dichas redes, deben cumplirse ciertos requerimientos con el fin de asegurar la integridad de la red. Una síntesis de los principales requerimientos de una red VANET se presenta a continuación [1,15,31,40,49-51].

- Coexistencia entre redes inalámbricas: las redes VANET deben operar sin interferir con otros sistemas inalámbricos que funcionen en frecuencias similares a los 5.9 GHz. Además no deben interferir con otras redes VANET en un mismo lugar.
- Robustez en los enlaces inalámbricos: los enlaces entre nodos y entre nodos e infoestaciones deben ser robustos con el fin de proporcionar bajas latencias, minimizar pérdidas de datos y proporcionar (dependiendo de la aplicación) el *throughput* adecuado.
- Recuperación de fallas en enlaces: debido a que no hay redundancia (de equipos y nodos), las VANET deben ser capaces de recuperarse ante fallas de enlaces.
- Alta eficiencia espectral: las redes vehiculares deben proporcionar comunicaciones en diversas situaciones desde escenarios con pocos nodos hasta situaciones donde el número de vehículos crece desmesuradamente, por lo que el uso eficiente del espectro es un importante requerimiento.
- Soporte para diversas tasas de datos: por la variedad de aplicaciones que pueden soportar las redes vehiculares, se requiere de un completo soporte para tasas de datos que van desde 10 kbps hasta varios Mbps.

- Soporte para aspectos de calidad de servicio: la calidad de servicio (QoS: *Quality of Service*) es un aspecto que se relaciona principalmente con las prioridades que tienen algunas aplicaciones o servicios al momento de la transmisión de datos en una red de telecomunicaciones. En redes VANET, las aplicaciones de seguridad tienen la mayor prioridad, seguidas por las aplicaciones de eficiencia de tráfico y las aplicaciones de *infotainment*.
- Escalabilidad: la escalabilidad es una propiedad deseable en las redes de telecomunicaciones e indica la habilidad para manejar el crecimiento o aumento de nodos sin deteriorar la calidad. Por su naturaleza, las redes VANET deben permitir la adición de nodos en cualquier momento para asegurar la conectividad de los mismos.
- Seguridad y privacidad de los datos: la integridad de la información transmitida en redes vehiculares debe asegurarse con mecanismos de autenticación y encriptación para evitar pérdidas o robo de datos.

1.6.2. Desafíos

A diferencia de los requerimientos que establecen condiciones mínimas¹² de funcionamiento para las redes VANET, los desafíos representan exigencias adicionales (generalmente difíciles de alcanzar) que se deben considerar una vez la red entre en operación. El desafío principal de las redes VANET es lograr un balance adecuado entre las demandas de conectividad de nodos, utilización del ancho de banda, latencia, *throughput* y complejidad de la red.

Otros desafíos que presentan las redes vehiculares se resumen a continuación.

- Autenticación Vs. seguridad: aunque en las redes vehiculares la seguridad es un objetivo primordial al momento de intercambiar información entre los nodos, algunos conductores no estarán de acuerdo en dejar su anonimato cuando conduzcan por las vías compartiendo su información confidencial. En consecuencia, se requiere de un equilibrio entre la información compartida en redes VANET y la privacidad de los usuarios.
- Suplantación de identidad: es necesario un esquema de seguridad para prevenir la suplantación de identidad (tanto de vehículos como de conductores), con el fin de evitar falsas alertas o congestión en la red por culpa de altos flujos de datos hechos por personas inescrupulosas.
- Disponibilidad de la red para comunicaciones en tiempo real, comunicaciones multi-salto y demás.
- Baja tolerancia a errores (especialmente importante en aplicaciones de seguridad).

¹² Al hablar de condiciones “mínimas” de funcionamiento, se hace referencia a las condiciones en las que una VANET operaría normalmente soportando una o más aplicaciones.

- El amplio espectro de leyes relacionadas con el tráfico vehicular que varía de país a país puede llegar a ser un inconveniente para la implementación de redes vehiculares.
- Se deben brindar incentivos necesarios tanto a compañías manufactureras de vehículos como a gobiernos y consumidores para que la implementación de las redes VANET sea un hecho.
- Los mecanismos de seguridad y protección de la privacidad requieren una cantidad significativa de recursos de la red, razón por la cual, deben ser altamente eficientes en energía y moderados en complejidad.

Con los requerimientos, desafíos, tecnologías, bandas de frecuencia, aplicaciones y componentes de las redes VANET especificados, puede darse paso a los elementos que se encargan de brindar realismo al análisis mediante simulación de este tipo de redes, al manejar características propias de ambientes vehiculares y considerar parámetros específicos de manejo de los conductores. Se trata de los modelos de movilidad y se abordan con mayor profundidad en el siguiente capítulo.

2. CAPÍTULO II. MODELOS DE MOVILIDAD

2.1. INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta los elementos fundamentales de las redes vehiculares enunciados en el capítulo anterior, es necesario destacar las variables que puedan afectar el movimiento de los vehículos en las carreteras. Por esta razón, los modelos de movilidad surgen como estrategia para cuantificar los aspectos más relevantes relacionados con la movilidad de los nodos en las VANET.

Específicamente, los modelos de movilidad hacen referencia al patrón de movimiento de los nodos en una red *ad hoc* y determinan la ubicación de éstos en la topología en un instante de simulación dado. Además describen el cambio de posición, velocidad y aceleración de los nodos en el tiempo [52-55]. Para redes vehiculares existen modelos de movilidad caracterizados por adecuarse a las características especiales de éstas redes.

Los modelos de movilidad para redes vehiculares deben reflejar de manera realista el comportamiento del tráfico considerando elementos que pueden afectar las comunicaciones en las VANET. Dichos elementos a tener en cuenta son, entre otros, el ancho de la carretera, el tamaño de las calles, el tipo y la velocidad promedio de los vehículos, el espacio entre éstos y los mecanismos de control de tráfico [56].

Asimismo, algunos modelos de movilidad cuantifican las características particulares de conducción de las personas (como su estilo de conducción, su agresividad al volante, etc.) con el fin de incrementar la veracidad de los datos al momento de realizar simulaciones de redes vehiculares.

Es necesario resaltar la importancia que tienen las simulaciones en redes vehiculares, ya que son un método eficiente, económico y seguro para el avance en el desarrollo de tecnologías, estándares y protocolos. En vista de esto, los simuladores de redes VANET se basan en modelos de movilidad para proporcionar realismo a sus resultados.

Si bien es cierto que los estudios acerca de la movilidad en las vías datan de hace unas décadas atrás, dichas investigaciones se centraron únicamente en analizar el flujo de tráfico y lo concerniente al mejoramiento de la movilidad. Mientras que, actualmente, los modelos de movilidad se utilizan en conjunto con procesos de comunicación y simuladores computacionales con el fin de procesar de manera eficiente la información.

Como se mencionó en el capítulo anterior, dadas las características especiales de las redes vehiculares, los modelos de movilidad utilizados en redes VANET deben seguir las especificaciones particulares de la movilidad vehicular para describir de manera realista el movimiento de los vehículos. Por esta razón, los modelos de movilidad pensados inicialmente para redes MANET no son adecuados para redes vehiculares [57].

Debido a esto, surgen diversas clasificaciones para los modelos de movilidad relevantes en redes vehiculares. En las secciones subsiguientes se estudian dichas clasificaciones, los modelos más utilizados en redes VANET y las características más importantes a tener en cuenta al momento de simular modelos de movilidad.

2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE MOVILIDAD

Los modelos de movilidad en redes vehiculares se clasifican de acuerdo a las características con las que describen el patrón de movimiento de los nodos. Específicamente, hay cuatro clasificaciones para los modelos de movilidad, las cuales se describen a continuación.

2.2.1. Modelos Aleatorios

Los modelos aleatorios describen el movimiento de los vehículos mediante patrones generados aleatoriamente y especifican situaciones en las cuales los nodos tienen la libertad de moverse en cualquier dirección y con distintas velocidades. Para el caso de las redes VANET, los modelos de movilidad aleatorios son poco utilizados debido a que los vehículos están restringidos a moverse a lo largo y ancho de las vías y no pueden tomar caminos aleatorios o desordenados. Esta clasificación de modelos de movilidad es relevante en redes MANET dado que los nodos pueden moverse sin restricciones, ubicándose en esta clasificación modelos típicos de redes móviles ad hoc como *Random Waypoint*, *Random Walk*, entre otros [58].

Estos modelos son similares a los denominados Modelos Sintéticos, los cuales se basan en el desarrollo de criterios matemáticos (a través de cálculos y algoritmos) que reflejan efectos reales de la movilidad y al igual que los modelos aleatorios, no son muy utilizados en redes vehiculares por la restricción en el movimiento de los nodos.

2.2.2. Modelos de Tráfico

Los modelos de tráfico se basan exclusivamente en estudios teóricos de tráfico para tratar de cuantificar una topología de red. Estos modelos establecen el patrón de movimiento de los vehículos en las simulaciones con base a teorías de tráfico, lo que contribuye a lograr simulaciones detalladas del flujo vehicular pero, al igual que los modelos aleatorios, el no incluir características propias de redes vehiculares y sus nodos (como el estilo de conducción, la longitud de los vehículos, el espacio entre vehículos en intersecciones, etc.) hace que sean utilizados únicamente para estudios particulares [59].

Los modelos de tráfico basan su funcionamiento en otro tipo de modelos denominados Modelos Basados en Esquemas, los cuales se caracterizan por contar con esquemas ya establecidos para el estudio de la movilidad y no permiten modificaciones en sus características (debido a que éstas ya vienen implícitas en los estudios teóricos que las soportan).

2.2.3. Modelos de Comportamiento

Dado que los modelos de movilidad generalmente se enfocan en describir las características de los vehículos, vías y demás, surgió una clasificación adicional para algunos modelos que se centran en describir el comportamiento de los conductores antes que otras variables.

Es por esto que los modelos de comportamiento toman como variables más relevantes el estilo de conducción de las personas y sus posibles reacciones ante eventos¹³ con el fin de evitar patrones de movimiento aleatorios. Los datos obtenidos mediante estos modelos se ajustan a simuladores computacionales con el fin de analizar sus posibles consecuencias en redes VANET [60].

Similares a los modelos de comportamiento surgen los Modelos Basados en Encuestas, en los cuales se recolecta información acerca de los hábitos de conducción de las personas por medio de encuestas para luego incorporar dicha información a los simuladores. Estos modelos vienen a ser una sub-categoría de los modelos de comportamiento, ya que reúnen información de conducción de una manera particular.

2.2.4. Modelos de Flujo

A diferencia de los modelos de tráfico, los modelos de flujo consideran numerosas características de las redes vehiculares y clasifican el nivel de detalle de las variables a tener en cuenta. Por ende, dentro de los modelos de flujo, se encuentra la taxonomía más mencionada en la literatura: *modelos de movilidad macroscópicos, microscópicos y mesoscópicos*. Estos modelos se diferencian por su nivel de profundidad al momento de caracterizar redes vehiculares de la siguiente manera: los modelos macroscópicos se basan en las características externas al nodo (tamaño de calles, obstáculos, intersecciones, cruces, paradas, semáforos, etc.), además de analizar la densidad y el flujo de tráfico como un todo. Los modelos microscópicos se centran en lo que concierne al vehículo en sí (velocidad individual, aceleración, criterios de adelanto, estilo particular de conducción, etc.) y los modelos mesoscópicos buscan un equilibrio entre características macroscópicas y microscópicas [61].

Cabe destacar que los modelos de comportamiento descritos en el numeral 2.2.3 comparten características con los modelos microscópicos, pero se diferencian fundamentalmente en que los primeros priorizan el estilo de conducción de las personas antes que cualquier otra variable; mientras que los modelos microscópicos no se especializan en una única característica y consideran igual de relevantes e importantes todas las variables que analizan.

Esta categoría de modelos se relaciona con los denominados Modelos Basados en Simuladores de Tráfico, ya que estos proporcionan la información especificada en las categorías macroscópica, microscópica y mesoscópica como: simulación de accidentes de tráfico, congestión vial, semáforos y paradas, velocidad de los nodos, agresividad al conducir, entre otros.

Debido a la naturaleza de este trabajo de grado, los modelos de movilidad más relevantes son los modelos microscópicos, ya que el área de simulación considerada es una pequeña porción de la ciudad de Popayán, y se evaluará el impacto al aplicar diferentes modelos de movilidad y variaciones de velocidad, sobre una comunicación de datos en nodos individuales. Los modelos de movilidad microscópicos más relevantes en redes VANET se muestran en la Figura 2.1 junto con la clasificación descrita anteriormente. Estos modelos microscópicos se describen en la sección 2.3 de este documento.

¹³ Eventos tales como: frenadas violentas, cambios repentinos de carril, paradas inesperadas, entre otros.

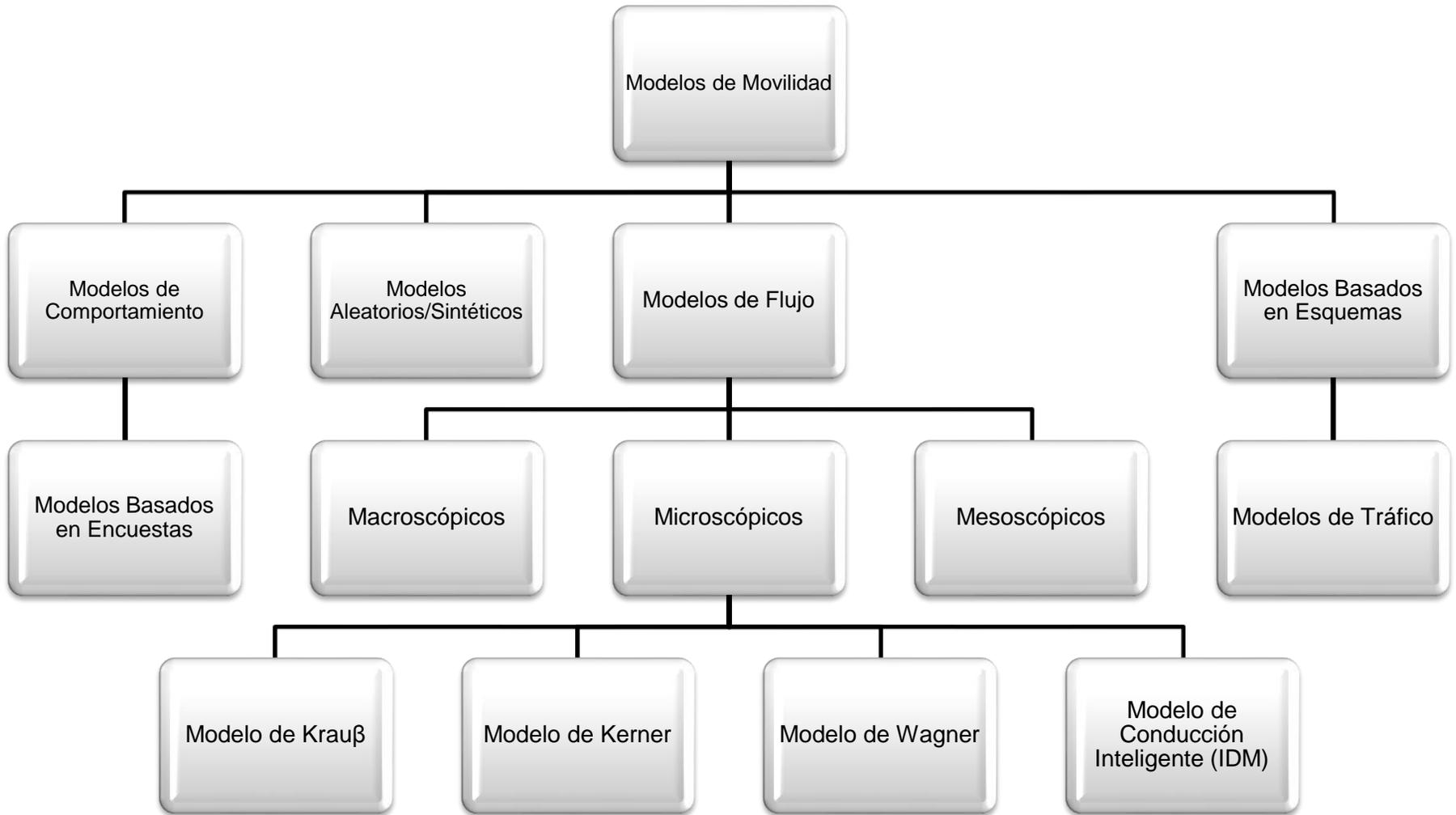


Figura 2.1 Clasificación de los modelos de movilidad. Por los Autores.

Una característica importante de algunos modelos de movilidad es su flexibilidad y facilidad con que permiten ser adaptados a condiciones particulares de trabajo. En consecuencia surgen modelos propios, especificados por autores para cumplir requerimientos puntuales. Por esta razón (y para evitar confusiones) se ha propuesto un mapa conceptual con las principales variables que componen un modelo de movilidad, de dicho mapa pueden realizarse especializaciones dependiendo de los requerimientos particulares de cada proyecto. El mapa se observa en la Figura 2.2.

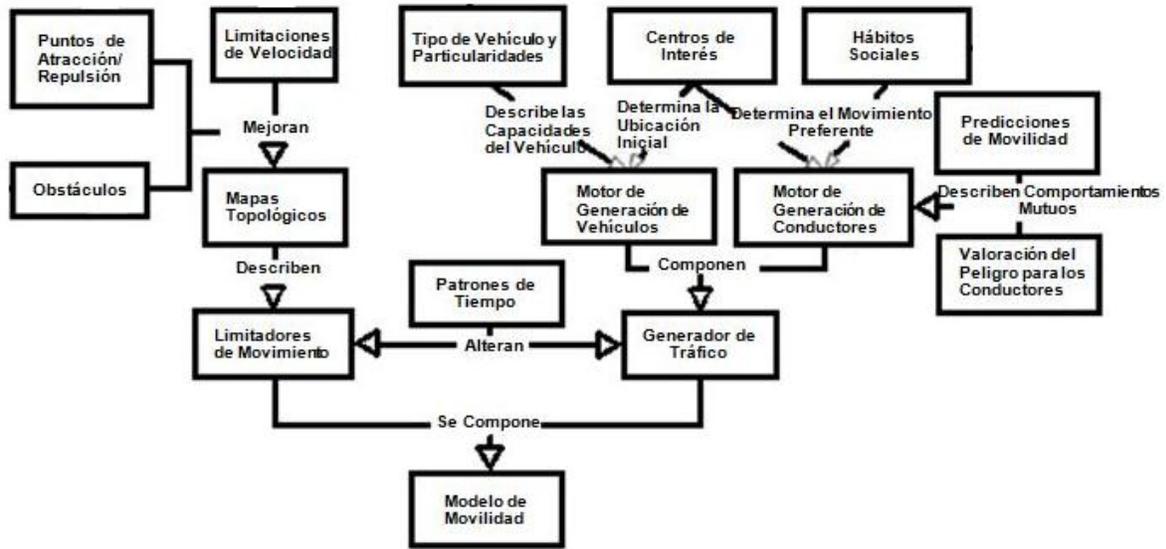


Figura 2.2 Mapa conceptual para la generación de un modelo de movilidad. Adaptado de [5,57,64-66]

Dada la flexibilidad de ciertos modelos de movilidad y, tomando como base el mapa conceptual mostrado en la Figura 2.2, se propone una adaptación de dicho mapa al entorno de Colombia; puesto que existen particularidades que únicamente se presentan en este contexto. El mapa se observa en la Figura 2.3.

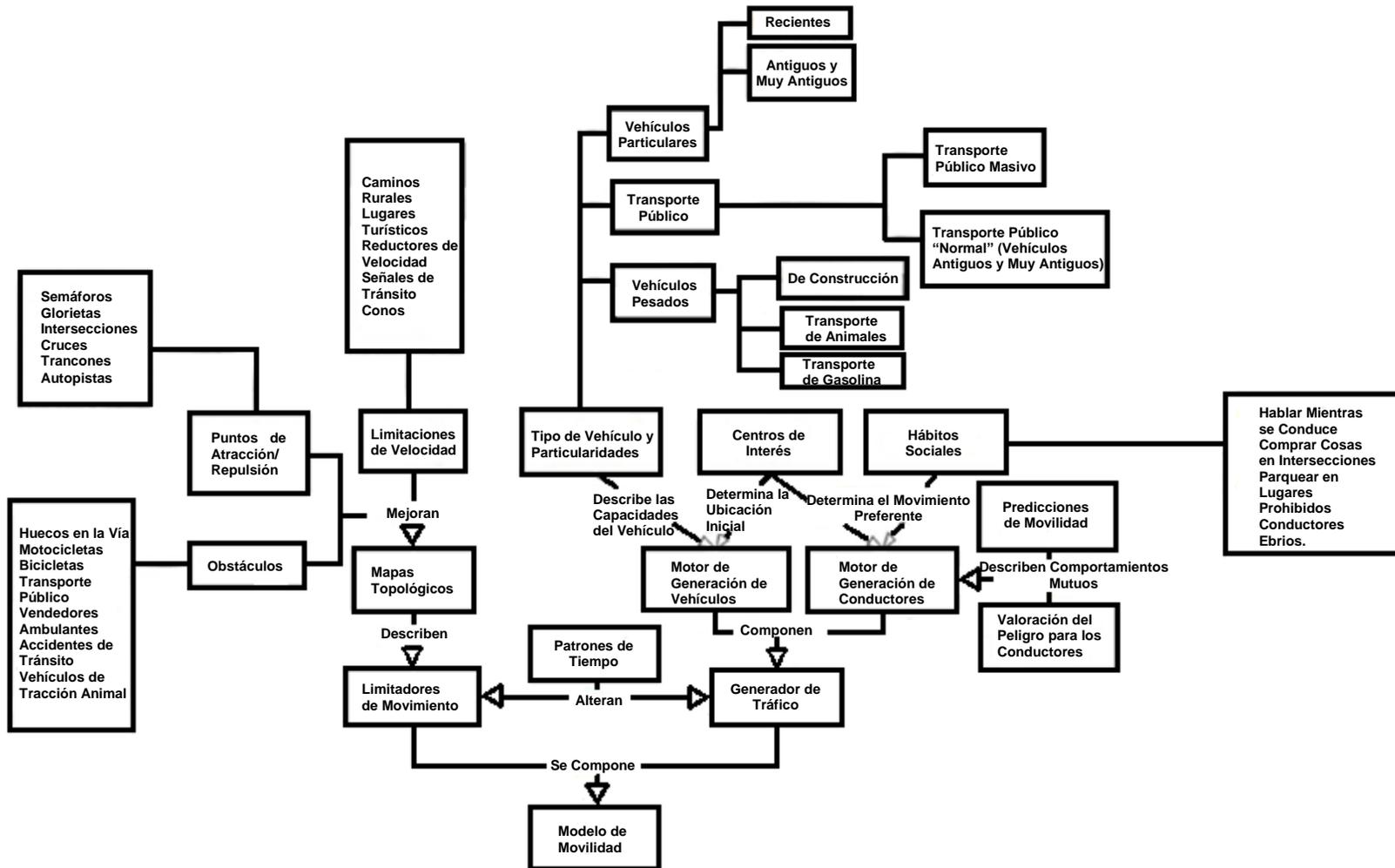


Figura 2.3 Mapa conceptual adaptado al entorno colombiano. Basado en [5,57,64-66]

La descripción específica de las variables que componen el mapa conceptual de la Figura 2.3 se encuentra en el Anexo A de este trabajo de grado.

Debido a que los modelos de flujo (y en consecuencia los modelos macroscópicos, microscópicos y mesoscópicos) son los más nombrados en la literatura, en general las simulaciones de redes vehiculares basan sus resultados en dichos modelos de movilidad. Por consiguiente, y dado el enfoque de este trabajo de grado, es necesaria una descripción acerca de los modelos de movilidad microscópicos más utilizados en redes vehiculares.

2.3. MODELOS DE MOVILIDAD MICROSCÓPICOS EN REDES VANET

Con la clasificación de los modelos de movilidad descrita y conociendo que los modelos de flujo son los más utilizados para las simulaciones de redes vehiculares, se presenta a continuación una descripción general de los modelos de movilidad más relevantes en redes VANET haciendo énfasis en modelos microscópicos.

2.3.1. Modelo de Krauß

El modelo de movilidad presentado por Stefan Krauß en 1998 se fundamenta en el movimiento de los vehículos predecesores. La idea principal de este modelo es que los nodos deben modificar su velocidad dependiendo de los cambios de velocidad que realice el vehículo predecesor, esto con el fin de evitar choques y colisiones [67]. En este modelo, la velocidad de un nodo está definida por la siguiente ecuación:

$$v(t + 1) = v_1(t) + \frac{g(t) - v_1(t)}{\tau_b(t) + 1} - \eta(t) \quad (1)$$

Donde v es la velocidad del nodo analizado, v_1 la velocidad del nodo predecesor, t el tiempo, τ_b el tiempo de reacción, $g(t)$ es el espaciamiento entre vehículos en el tiempo y η la pasividad o agresividad del conductor (entre 0 y 1 respectivamente). De esta ecuación se observa que la velocidad del nodo analizado (v) está continuamente restringida por los vehículos a su alrededor (apreciable en los parámetros v_1 y $g(t)$).

Aunque el modelo está basado en el movimiento de los vehículos predecesores, se considera como un modelo microscópico debido a que esta característica es un resultado directo del espaciamiento entre vehículos, el tiempo de reacción y la agresividad del conductor; además se especializa en mostrar resultados particulares para cada vehículo.

2.3.2. Modelo de Kerner

Boris Kerner definió este modelo en 1998 y se conoce también como *teoría de las tres fases de tráfico* [68]. Este modelo se centra principalmente en el análisis de congestión vehicular en flujos de tráfico determinados y define tres estados para explicarlas, los cuales se describen a continuación.

- **Flujo libre:** esta característica se da cuando la tasa de vehículos por unidad de tiempo es menor a la densidad de tráfico¹⁴. Dicho de otro modo, los vehículos fluyen por las vías sin problema alguno y no se presenta ningún tipo de congestión.
- **Flujo sincronizado:** se caracteriza por una densidad de tráfico que permite a los vehículos desplazarse con fluidez, pero que en ocasiones puede obligar a reducir la marcha. Un ejemplo de este estado es un flujo de tráfico analizado particularmente, en el que los nodos que circulan adelante o en los primeros lugares (relativos al flujo) presentan flujo libre, pero los nodos ubicados a una determinada distancia de los que circulan adelante se encuentran con una situación de cuello de botella, presentando congestión vehicular.
- **Congestión en movimiento**¹⁵: esta fase se presenta cuando la densidad de tráfico es extremadamente alta y la velocidad a la que circulan los vehículos es casi nula. Se caracteriza porque ambos frentes del flujo de tráfico (nodos adelante y atrás, relativos al flujo) tienen velocidad constante. Esta velocidad es baja en relación a la manejada en las otras fases y se mantiene al cambiar de fase.

El modelo también explica las transiciones entre las diversas fases y sus características. Además, por considerar estados individuales para cada nodo, el modelo de Kerner entra en la categoría de modelo de movilidad microscópico.

2.3.3. Modelo de Wagner

El modelo de Wagner sostiene que la visión de que las personas reaccionan continuamente a los sucesos que se puedan presentar al momento de conducir es parcial y arbitraria. En consecuencia, este modelo planteado por Peter Wagner en 2008 toma en consideración dos factores esenciales: las personas conducen anticipándose y el control de los humanos durante la conducción no es continuo, sino discreto en el tiempo [69]. A cada uno de estos instantes de tiempo en el que los conductores realizan alguna acción se denominan puntos de acción y son considerados fenómenos aleatorios.

Wagner establece que la condición para conducir de modo seguro es una desigualdad en la que para cada intervalo de tiempo en donde se presente un punto de acción, la aceleración del nodo debe ser tal que el espacio que se recorre durante ese intervalo de tiempo debe ser menor al espacio que separa el vehículo del conductor con el vehículo precedente (espaciamiento entre vehículos). La ecuación (2) detalla este proceso.

$$d(v + a_{opt}\tau) + v\tau + \frac{1}{2}a_{opt}\tau^2 < d(V) + g \quad (2)$$

¹⁴ La densidad de tráfico se mide en vehículos por kilómetro (veh/km).

¹⁵ Denominada originalmente en Inglés como "Moving Jam"

Donde d es la distancia de frenado, v la velocidad del nodo, τ la duración del punto de acción, a_{opt} la aceleración óptima para ese intervalo de tiempo, V la velocidad del vehículo precedente y g la distancia de seguridad para evitar una colisión. Para cada punto de acción τ , la ecuación (2) debe satisfacerse para considerar la conducción como segura. La variable a encontrar es la aceleración óptima a_{opt} , por lo que, considerando una desaceleración o frenado constante de valor b , la ecuación (2) se transforma¹⁶ en:

$$a_{opt} = -\frac{v}{\tau} - \frac{b}{2} + \sqrt{\left(\frac{v}{\tau} - \frac{b}{2}\right)^2 + \frac{2bg + V^2 - v^2}{\tau^2}} \quad (3)$$

La ecuación (3) determina la aceleración óptima para una duración de un punto de acción (τ) dada. Si los nodos superan este valor de aceleración, la conducción de dichos nodos se considerará como insegura y pueden presentarse percances o accidentes, comprometiendo la seguridad de los demás nodos presentes en el flujo de tráfico. Como la variable clave del modelo de Wagner es la aceleración del nodo estudiado, puede considerársele como un modelo de movilidad microscópico.

2.3.4. Modelo de Conducción Inteligente

El Modelo de Conducción Inteligente (IDM: *Intelligent Driving Model*) es un modelo determinístico en el cual la aceleración de un vehículo depende de su velocidad, de los vehículos que lo rodean y del espacio que tiene con el vehículo precedente. El modelo también plantea la posibilidad de simular el comportamiento de distintos conductores (agresivos, normales y tímidos) y considera las diferencias entre conductores de vehículos particulares y camiones [70]. Este tipo de comportamiento se rige por la siguiente ecuación:

$$\delta = \Delta x_{min} + vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \quad (4)$$

Con δ como distancia existente entre vehículos y los siguientes parámetros:

- Velocidad deseada (v): es la velocidad máxima que un conductor desea alcanzar en condiciones en las que la densidad de tráfico permita circular con rapidez.
- Tiempo especial (T): hace referencia al tiempo requerido para que la distancia entre un nodo y otro sea considerable y segura. Dicha distancia surge de multiplicar la velocidad deseada v con el tiempo especial.
- Aceleración deseada (a): la aceleración depende del tipo de conductor: entre más agresivo sea, mayor será su aceleración y viceversa.
- Distancia mínima entre parachoques (Δx_{min}): cuanto más agresivo es un conductor, menor es la distancia dejada entre parachoques; los conductores de camiones dejan, generalmente, más distancia.

¹⁶ El procedimiento para transformar la ecuación lo describe directamente el autor del modelo de movilidad en [69].

- Frenado confortable (b): describe la desaceleración de un vehículo al aproximarse a un obstáculo o cruce en la calzada. Los conductores agresivos requieren un frenado mayor debido a sus elevadas velocidades.

En la Tabla 2.1 se muestra un resumen de las características que influyen en el modelo de movilidad IDM para diversos tipos de conductores.

PARÁMETROS IDM	NORMAL	TÍMIDO	AGRESIVO	CAMIÓN
VELOCIDAD DESEADA v (km/h)	120	100	140	85
TIEMPO ESPACIAL T (s)	1.5	1.8	1.0	2.0
DISTANCIA DE SEGURIDAD Δx_{min} (m)	2.0	4.0	1.0	4.0
ACELERACIÓN a (m/s^2)	1.4	1.0	2.0	0.7
FRENADO b (m/s^2)	-2.0	-1.0	-3.0	-2.0

Tabla 2.1 Parámetros del modelo IDM para varios comportamientos de conductores. Tomada de [70].

El modelo de movilidad IDM se considera un modelo microscópico debido a las características intrínsecas de cada tipo de conductor, al énfasis que hace en la conducción segura y al estudio en particular de un único nodo.

Los modelos de movilidad mencionados anteriormente consideran variables relacionadas con la velocidad de los nodos, el estilo de conducción, la aceleración, entre otros, por lo cual dichos modelos se consideran microscópicos. Acorde a lo indicado anteriormente, los modelos microscópicos son los más relevantes para el desarrollo de este trabajo de grado debido a que está enfocado a un área específica y relativamente pequeña. Aparte de los ya descritos, existen otros modelos que la literatura referencia. Entre éstos se encuentran los siguientes [5,52,64,71-74]:

- ❖ Modelo de Velocidad Constante (CSM: *Constant Speed Model*): este modelo es el típico ejemplo de modelo estocástico, por lo que el movimiento de los vehículos es generado bajo parámetros aleatorios. El movimiento de los nodos está estructurado en trayectos así: al principio de un trayecto un nodo elige su siguiente destino, una vez elegido el destino, el vehículo calcula la ruta basándose principalmente en el camino más corto posible, y la velocidad del nodo en estudio siempre será constante. De ahí que este modelo sea considerado como macroscópico dada la importancia de los puntos de inicio y fin del trayecto.
- ❖ Modelo Manhattan: este modelo tiene como característica particular el manejo de un mapa tipo cuadrícula o rejilla, de tal modo que todas las cuadras son rectangulares, y en los cruces los nodos eligen aleatoriamente si cruzan a la izquierda (con probabilidad del 25%), cruzan a la derecha (con probabilidad del 25%) o siguen derecho (con probabilidad del 50%). La velocidad de los nodos está condicionada a la aceleración del nodo predecesor y a la distancia entre vehículos, por ende el modelo Manhattan se considera como mesoscópico al tomar en cuenta importantes características macroscópicas como el mapa en rejilla, y microscópicas como la aceleración de los nodos predecesores.

❖ **Modelo de Viajes Aleatorios (RTM: *Random Trip Model*):** el modelo RT está implementado como un modelo *Random Waypoint* en donde el movimiento de los nodos está limitado a un mapa subyacente (como una rejilla tipo Manhattan). Los puntos de inicio de cada viaje se ubican en el punto final del último viaje o en una posición aleatoria al inicio de las simulaciones.

❖ **Modelo de Señales de Pare (SSM: *Stop Sign Model*):** en este modelo, cada cruce presenta una señal de pare, así que cualquier vehículo que se acerque a la intersección debe detenerse en la señal por un período de tiempo específico. Además el modelo especifica que los nodos únicamente pueden adelantar si la carretera por la que se mueven es de más de un carril. En consecuencia, el modelo SSM se considera como macroscópico, ya que describe el movimiento de los nodos por medio de las intersecciones en el mapa.

❖ **Modelo de Tráfico Fluido (FTM: *Fluid Traffic Model*):** este modelo utiliza una corriente de tráfico para aproximarse desde un nivel microscópico a la realidad. La velocidad se describe como una función monótona decreciente de la densidad de vehículos, forzando a ajustar la velocidad cuando los niveles de congestión alcanzan un nivel crítico.

❖ **Modelo de Gipps:** Peter Gipps propone una estructura lógica para adecuar a los simuladores, las decisiones que toman los conductores antes de cambiar de carril. El modelo trata de cubrir situaciones de manejo urbanas en donde las señales de tránsito, obstrucciones y vehículos pesados se consideran influencias externas. La estructura está diseñada para asegurar que los nodos en las simulaciones se comporten lógicamente cuando se enfrenten con situaciones comúnmente encontradas en el tráfico real. Este modelo se considera como microscópico, dada la especialización hacia las decisiones de los conductores.

❖ **Modelo de Wiedemann:** es un modelo psicofísico¹⁷ y se introdujo principalmente porque el comportamiento de diversos conductores ante estímulos externos no es siempre el mismo. Es por esto que este modelo analiza particularmente la reacción de los conductores ante diversos tipos de eventos y presenta cuatro estados de conducción: conducción libre, aproximación, seguimiento y frenado. En vista de este análisis, se considera el modelo de Wiedemann como microscópico.

❖ **Modelo IDM con Gestión de Intersecciones (IDM-IM: *IDM with Intersection Management*):** es una variante del modelo IDM al que se ha añadido la capacidad de gestionar las intersecciones haciendo énfasis en la interacción vehículo a vehículo. El modelo IDM-IM es capaz de gestionar intersecciones controladas mediante señales de pare y semáforos. El resultado de esto es un modelo de movilidad mesoscópico al considerar parámetros intrínsecos de cada conductor junto con la gestión de intersecciones.

¹⁷ La psicofísica es una rama de la psicología que estudia la relación entre la magnitud de un estímulo físico y la intensidad con la que este es percibido por parte de un observador.

Los anteriores modelos de movilidad se utilizan generalmente en proyectos con aplicaciones específicas y han sido planteados por los autores cuando un modelo de movilidad no cumple totalmente sus requerimientos. De los anteriores modelos cabe destacar el modelo Manhattan, el cual se utiliza con relativa frecuencia al analizar el rendimiento de protocolos de enrutamiento, debido a que el entorno manejado es una cuadrícula o retícula.

La Tabla 2.2 muestra un resumen en la clasificación de los modelos de movilidad descritos previamente.

MODELO DE MOVILIDAD	MACROSCÓPICO	MICROSCÓPICO	MESOSCÓPICO
Krauβ		✓	
IDM con gestión de intersecciones			✓
Kerner		✓	
Wiedemann		✓	
Wagner		✓	
Gipps		✓	
IDM		✓	
De tráfico fluido		✓	
De velocidad constante	✓		
De señales de pare	✓		
Manhattan			✓
De viajes aleatorios	✓		

Tabla 2.2 Clasificación de los modelos de movilidad. Por los Autores.

Con la identificación de los diversos modelos de movilidad macroscópicos, mesoscópicos y microscópicos y la descripción de los más relevantes de éstos últimos, es necesario resaltar las variables de la movilidad vehicular a tener en cuenta por parte de los modelos de movilidad para lograr simulaciones realistas.

2.4. MOVILIDAD VEHICULAR

Todos los modelos de movilidad referidos anteriormente tienen como objetivo principal describir la movilidad vehicular para adaptar los datos resultantes a las diversas herramientas de simulación. Es por esto que cuando se planean escenarios de comunicaciones en ambientes vehiculares se deben considerar las siguientes características de la movilidad vehicular [64,65,75,76]:

- ✧ Movimientos geográficamente restringidos: los vehículos están restringidos a moverse únicamente por las carreteras o vías de la ciudad, no pueden tomar rutas totalmente aleatorias y caóticas.
- ✧ Señales de tránsito: los conductores deben obedecer y acatar las reglas y señales de tránsito, por lo que los modelos de movilidad deben relacionarse con dichos elementos y reglas.
- ✧ Comportamiento de los conductores: caracterizados por los modelos de comportamiento, los demás modelos no deben dejar a un lado dicho parámetro.

- ✧ Tamaño de la cuadra: puede considerarse a una cuadra como la menor área rodeada por las calles y el tamaño de ésta determina el número de intersecciones. Debe tenerse en cuenta debido a que proporciona la frecuencia con la que pueden girar los vehículos.
- ✧ Movimiento interdependiente de los vehículos: aunque cada nodo es libre de tomar el camino que desee, de alguna manera puede verse influenciado por los otros nodos en dichas decisiones.

Al considerar los anteriores elementos junto con los modelos de movilidad, se logra una mejor aproximación de la realidad al momento de simular redes VANET.

2.5. TIPOS DE SIMULADORES PARA REDES VANET

Se presenta una descripción general acerca de los distintos tipos de simuladores para redes VANET, los cuales en conjunto permiten aumentar el realismo en las simulaciones.

2.5.1. Simuladores de tráfico vehicular

Los simuladores de tráfico vehicular permiten modelar escenarios de tráfico vehicular con detalles particulares como el número de carriles, patrones de conducción, simulación de accidentes. Tienen como base los estudios acerca del modelado de autopistas o intersecciones urbanas para la ingeniería de tráfico y la mayoría del software que tiene esta clasificación busca principalmente analizar la movilidad vehicular a nivel microscópico y macroscópico con un alto nivel de detalle.

Se conocen también como generadores de movilidad y se basan en los modelos de movilidad para generar trazas¹⁸ en donde está contenida toda la información acerca de las variables que manejan dichos modelos; además de los datos relacionados con mapas, obstáculos, entre otros [66,77].

2.5.2. Simuladores de red

Los simuladores de red permiten modelar redes de telecomunicaciones con características como enrutamiento, QoS, eficiencia, entre otras. Específicamente los simuladores de red toman las trazas generadas por simuladores de tráfico vehicular e implementan la comunicación inalámbrica (en el caso de las VANET), junto con sus estándares y protocolos correspondientes.

Esta categoría de simuladores permite estudiar el comportamiento de la red bajo diferentes condiciones, asimismo los usuarios pueden adecuar algunos simuladores pertenecientes a esta categoría para un mejor estudio de sus requerimientos específicos.

Los simuladores de red son particularmente útiles para evaluar el desempeño de protocolos de enrutamiento y *networking* (ya sean protocolos existentes o nuevos) y para proponer modificaciones a los existentes de una manera controlada y relativamente fácil [78].

¹⁸ Una traza es un conjunto de parámetros que contienen información acerca de micro y macromovilidad y son las variables de entrada de los simuladores de red.

2.5.3. Simuladores híbridos

Los simuladores híbridos crean una unión híbrida entre simuladores de tráfico y simuladores de red a través de una interfaz diseñada para tal efecto. En consecuencia, ambos simuladores trabajan en paralelo y pueden interactuar dinámicamente entre sí mediante la alteración de los patrones de movimiento basados en los flujos de red y viceversa. Este enfoque híbrido toma en consideración las mejores características de simuladores de tráfico vehicular y de red, por lo que son bastante utilizados al momento de simular redes VANET [79].

No obstante, los simuladores híbridos requieren numerosos recursos computacionales debido a que tanto el simulador de tráfico vehicular como el de red corren paralelamente y de forma simultánea en el mismo equipo. La Figura 2.4 muestra un esquema de la relación en el funcionamiento de este tipo de simuladores.

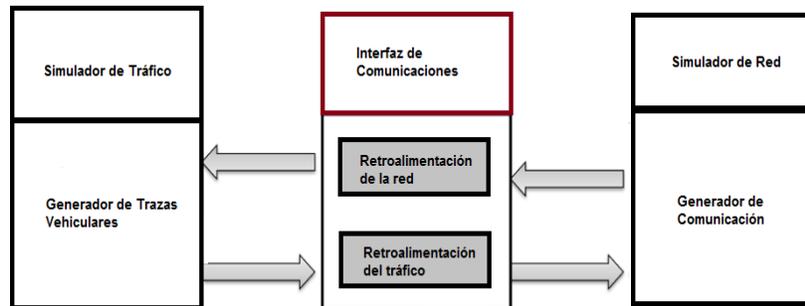


Figura 2.4 Relación en el funcionamiento de simuladores híbridos. Por los Autores.

2.5.4. Simuladores VANET

Los simuladores VANET integran un simulador de red y un generador de movilidad, lo cual tiene como ventaja eliminar el procedimiento de integración de los simuladores, pero a costa de un desarrollo limitado de herramientas y librerías. Estos simuladores compensan la falta de protocolos elaborados con una colaboración directa entre la red y el simulador de tráfico y su principal objetivo es lograr un equilibrio entre características de tráfico y de red sin sacrificar recursos computacionales. La Figura 2.5 muestra un esquema de la relación en la operación para este tipo de simuladores.

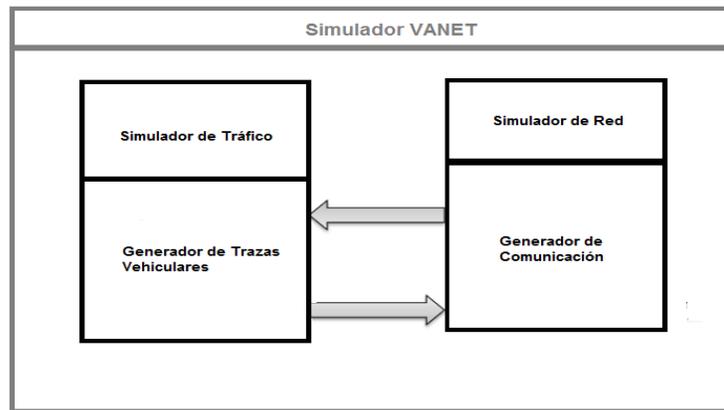


Figura 2.5 Relación en el funcionamiento de simuladores VANET. Por los Autores.

Con los modelos de movilidad descritos, su clasificación, características, los parámetros de la movilidad vehicular a tener en cuenta y los diversos tipos de simuladores para redes VANET, se tiene una idea acerca de la importancia de dichos modelos en la simulación de redes vehiculares. En el siguiente capítulo se abordan de manera general las distintas herramientas de simulación disponibles para redes VANET, se enfatiza en los programas elegidos para tal fin y se presentan los escenarios a simular, sus características, pruebas y análisis de resultados.

3. CAPÍTULO III. SIMULACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe la metodología de simulación, se definen los escenarios y casos que permitirán evaluar el desempeño de la red y se elige la herramienta software para el desarrollo del proyecto en cuestión. Se consideraron dos escenarios diferenciados principalmente por el número de usuarios presentes en la red VANET. Dichos escenarios se dividen en dos casos, uno para velocidades bajas y otro para velocidades altas de los nodos; además para cada caso se analizan los resultados cuando los nodos están gobernados bajo distintos modelos de movilidad.

3.2. SELECCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

Dado el enfoque de este trabajo de grado se requiere que las herramientas de simulación cumplan con los siguientes requerimientos:

- ✓ **Áreas de trabajo reales:** el área deseada de simulación debe ser real, por lo que el simulador debe permitir la importación de mapas realistas de diversas fuentes.
- ✓ **Diversos tipos de vehículos:** para brindar un nivel de detalle mayor, la simulación de tráfico vehicular debe soportar diferentes tipos de vehículos. Lo ideal es que soporte desde vehículos particulares hasta buses y camiones.
- ✓ **Soporte para varios modelos de movilidad:** como este trabajo de grado busca cuantificar el impacto de la variación del modelo de movilidad en una comunicación de datos de una VANET, es primordial que las herramientas elegidas soporten más de un modelo de movilidad.
- ✓ **Velocidad variable:** la velocidad de los nodos debe ser variable en el tiempo para aumentar el realismo de la simulación. Además debe ser dependiente del tipo de vehículo.
- ✓ **Manejo de características de movilidad vehicular:** la simulación debe implementar cruces, intersecciones y semáforos presentes en el área deseada.
- ✓ **Soporte del estándar IEEE 802.11p:** es importante que se tenga soporte para el protocolo IEEE 802.11p, con el fin de establecer comunicaciones V2V.

A continuación se describen generalmente las herramientas de simulación para redes VANET más importantes, sus características y otros datos de interés.

3.2.1. Herramientas software para la simulación de tráfico vehicular

Se presenta una descripción de las principales herramientas para la simulación de tráfico vehicular, las cuales modelan principalmente lo relacionado con movilidad vehicular, vehículos, mapas, cruces, intersecciones y demás.

- **SUMO (*Simulation of Urban MObility*):** es un programa diseñado para soportar grandes tamaños de escenarios de red. Altamente portable y *open source*, incluye diferentes tipos de vehículos, Interfaz Gráfica de Usuario (GUI: *Graphical User Interface*), manejo de jerarquías en los mapas, posibilidad de importación de mapas, entre otras características. Está centrado en la simulación de modelos de tráfico a nivel microscópico y puede importar varios formatos de red como XML, ArcView, Visum, entre otros [80].

- **MOVE (MObility model generator for VEhicular networks):** este simulador está construido en el tope de SUMO y genera rápidamente trazas de movilidad para simuladores de red. Presenta una GUI que permite al usuario crear escenarios realistas de simulación sin la complicación de escribir scripts de simulación [81].
- **CityMob:** herramienta desarrollada en la Universidad Politécnica de Valencia que genera trazas para el simulador de red NS-2. Específicamente diseñado para utilizar el modelo de movilidad Manhattan y particularmente utilizado para comprobar el rendimiento de protocolos de enrutamiento en redes VANET [63,82].

3.2.2. Herramientas software para la simulación de red

Las herramientas para la simulación de red se enfocan principalmente en caracterizar lo relacionado a los escenarios de comunicación, método de acceso y enrutamiento. Se presenta una descripción general acerca de las más relevantes para redes VANET.

- **NS-2:** es el simulador más conocido, aunque esto no significa que sea el mejor. Su popularidad no se debe a su simplicidad o eficiencia, sino a su modularidad y su universalidad. El proyecto Monarch¹⁹ lo extendió, ampliando su horizonte hacia redes inalámbricas e implementando los principales protocolos de redes MANET y VANET, movilidad en los nodos, capa física realista con modelos de radio-propagación y capa MAC para control de acceso al medio [83].
- **NS-3:** la nueva versión del simulador NS-2 presenta mejoras en rendimiento, tiempo de simulación, redes soportadas y otras características. El objetivo principal de este simulador es “desarrollar un entorno de simulación para la investigación en redes, debe seguir las necesidades de la investigación moderna en redes y debe fomentar la contribución de la comunidad científica y académica”. Paulatinamente empieza a reemplazar a su predecesor como el simulador más popular [84].
- **OMNeT++:** es una herramienta extensible y modular, basada en componentes de la biblioteca de C++. Permite simular redes cableadas, inalámbricas, redes de sensores, redes ópticas, entre otras; además ofrece un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE: *Integrated Development Environment*) basado en Eclipse, además de un entorno de ejecución gráfico y es anfitrión²⁰ de otras herramientas [85].

3.2.3. Herramientas software híbridas

Las herramientas híbridas proporcionan una interfaz de comunicaciones entre simuladores de tráfico y simuladores de red; obteniendo así un enlace de comunicaciones bidireccional y en tiempo real. Las principales herramientas software híbridas se describen a continuación.

¹⁹ El proyecto *Monarch* fue desarrollado en la Universidad Carnegie Mellon en Estados Unidos.

²⁰ OMNeT++ es anfitrión de otras herramientas al permitir su ejecución simultánea y paralelamente.

- **TraNS (Traffic and Network Simulation Environment):** es un entorno de simulación que interconecta un generador de movilidad y un simulador de red. Es una herramienta para construir simulaciones realistas de redes VANET y provee una retroalimentación entre el comportamiento del vehículo y el modelo de movilidad. Está desarrollado en Java y en C++ y conecta el simulador de tráfico vehicular SUMO con el simulador de red NS-2.
- **MobiREAL:** MobiREAL es un simulador híbrido que genera sus propias trazas de movilidad para ser exportadas al simulador de red GTNetS. Debido a esto provee una nueva metodología para modelar y simular redes VANET y adicionalmente, permite simular peatones (para comunicaciones V2P) [86].
- **VeINS (Vehicles In Network Simulation):** consiste en un marco de simulación compuesto por un simulador de redes basado en eventos (OMNeT++) y un generador de movilidad microscópico (SUMO). Ambos dominios se acoplan bidireccionalmente por medio de un *socket* TCP y trabajan en tiempo real, de manera que la comunicación entre vehículos tiene efectos en la movilidad del tráfico [87].

3.2.4. Herramientas software VANET

Finalmente, las herramientas software VANET presentan embebido un simulador de tráfico y un simulador de red, evitando así el proceso de integración de simuladores pero a costa de reducir las capacidades de cada tipo de simulador. Existen pocas herramientas VANET dado que algunas son consideradas como herramientas híbridas.

- **GrooveNet:** es un simulador VANET desarrollado en conjunto con General Motors, está desarrollado en Java y permite la comunicación entre vehículos simulados y vehículos reales. Cuenta con un generador de movilidad propio denominado *GrooveSim* y está enfocado principalmente en las vías estadounidenses al permitir la importación de mapas tipo TIGER [88].
- **NCTUns (National Chiao Tung University network simulator):** es un simulador VANET de alta fidelidad y extensible, capaz de simular diversos protocolos utilizados en redes cableadas e inalámbricas. Fue desarrollado en la Universidad Chiao Tung de Taiwan y no se centra específicamente en la movilidad de los vehículos, sino que proporciona una completa gama de herramientas de simulación de red [89].

La Tabla 3.1 resume las principales características de los simuladores previamente descritos.

CARACTERÍSTICAS	SIMULADORES DE TRÁFICO			SIMULADORES DE RED			SIMULADORES HÍBRIDOS			SIMULADORES VANET	
	SUMO	MOVE	CityMob	NS-2	NS-3	OMNeT	TraNS	MobiREAL	Veins	GrooveNET	NCTUns
Portabilidad	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x
Freeware	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Opensource	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	x	x
GUI	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓
Desarrollo continuo	✓	✓	x	x	✓	✓	x	x	✓	x	✓
Facilidad al configurar	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x		✓	✓	✓
Facilidad de uso	x	x	✓	x	x	x	x	x	✓	x	✓
Mapas Reales	✓	✓	x	ND	ND	ND	ND	ND	ND	✓	✓
Posibilidad de importación	✓	✓	x	ND	ND	ND	ND	ND	ND	x	✓
Modelos Microscópicos	✓	✓	✓	ND	ND	ND	ND	ND	ND	✓	x
Diferentes tipos de autos	✓	✓	✓	ND	ND	ND	ND	ND	ND	✓	ND
Protocolo 802.11p	ND	ND	ND	✓	✓	✓	ND	x	✓	x	✓

Tabla 3.1²¹ Comparación cualitativa entre simuladores para redes VANET. Por los Autores.

En la Tabla 3.1 se destacan las herramientas elegidas para la simulación de escenarios de redes VANET. Como simulador de tráfico se eligió SUMO y se utilizó MOVE como generador de *scripts* de movilidad, además de que ambas herramientas presentan un desarrollo continuo, se pueden descargar gratuitamente de Internet, soportan modelos de movilidad microscópicos, permiten la importación de mapas reales y presentan documentación para la configuración de variables específicas.

En adición a lo anterior, SUMO permite caracterizar varios tipos de vehículo, por lo que se realiza una mejor aproximación a la realidad al momento de la simulación de escenarios VANET.

Con el fin de caracterizar desde ahora el tipo de vehículos que se utilizaran en las simulaciones, la Tabla 3.2 describe el tipo de vehículo y su esquemático.

²¹ La diferencia entre “x” y “ND” en la notación de la Tabla 3.1 hace referencia al incumplimiento de la característica y a la incapacidad de soportar dicha característica respectivamente.

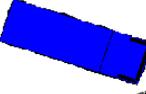
TIPO DE VEHÍCULO	DESCRIPCIÓN	ESQUEMÁTICO
PASSENGER	VEHÍCULO DEPORTIVO DE PASAJEROS	
PASSENGER/SEDAN	VEHÍCULO DEPORTIVO DE DOS PUERTAS	
PASSENGER/HATCHBACK	VEHÍCULO COUPÉ CON BAÚL RECORTADO	
PASSENGER/WAGON	VEHÍCULO FAMILIAR DE 5 PUERTAS	
PASSENGER/VAN	VEHÍCULO DE TRANSPORTE DE CARGAS PEQUEÑAS	
DELIVERY	VEHÍCULO DE TRANSPORTE DE CARGAS GRANDES	
EVEHICLE (VEHÍCULO ELÉCTRICO)	VEHÍCULO IMPULSADO POR GAS NATURAL	
TRANSPORT	CAMIÓN/TRACTOMULA	
BUS	BUS/COLECTIVO DE SERVICIO INTERMUNICIPAL	
BUS PEQUEÑO	BUS/COLECTIVO DE SERVICIO PÚBLICO	

Tabla 3.2 Tipos de vehículos soportados por SUMO. Por los Autores.

Como simulador de red se eligió a OMNeT++ dado que presenta un apropiado número de librerías y herramientas para redes VANET, además del acoplamiento bidireccional que puede realizar con SUMO y la transmisión de información en tiempo real.

Dada la elección de SUMO y OMNeT++ como simuladores de tráfico y de red respectivamente, el simulador híbrido que los interconecta y que permite la comunicación bidireccional en tiempo real es VeINS. Es por esto que ésta es la herramienta seleccionada para interconectar SUMO con OMNeT++ y lograr escenarios de simulación realistas, con diversos modelos de movilidad, con velocidad de los nodos variable y simulaciones en tiempo real.

En los Anexos B y C se encuentra respectivamente, información más detallada del análisis de las herramientas de simulación y la descripción el proceso de instalación y configuración de los simuladores elegidos, además del manual de usuario.

3.3. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

La metodología de simulación adoptada para llevar a cabo el desarrollo del proyecto se basa en la descrita por Ülgen y Wojcik en [90,91] y consta de los pasos descritos a continuación:

- a. Definición de escenarios y casos de simulación: se definen los escenarios implementados con sus casos de simulación y sus respectivos parámetros, a partir de los cuales se ejecutarán las pruebas de simulación.
- b. Definición de las características de los escenarios de simulación: se presentan las características comunes a todos los escenarios, como el área de simulación, parámetros a nivel MAC y Físico entre otras.
- c. Ejecución de las pruebas de simulación: con los escenarios, los casos y los parámetros completamente definidos, se ejecutan las pruebas de simulación.
- d. Análisis de resultados: teniendo en cuenta los parámetros de desempeño a evaluar y finalizada la ejecución de las pruebas de simulación, se presentan los resultados arrojados por el simulador con su análisis correspondiente.

3.3.1. Definición de escenarios y casos de simulación

Para la definición de los escenarios, sus respectivos casos y las variables a modificar se tuvo en cuenta la pregunta de investigación que busca responder este trabajo de grado; por lo tanto la caracterización de escenarios parte del número de usuarios, sigue con la variación de la velocidad y, por último, la variación del modelo de movilidad. El mapa conceptual de este proceso se muestra en la Figura 3.1.

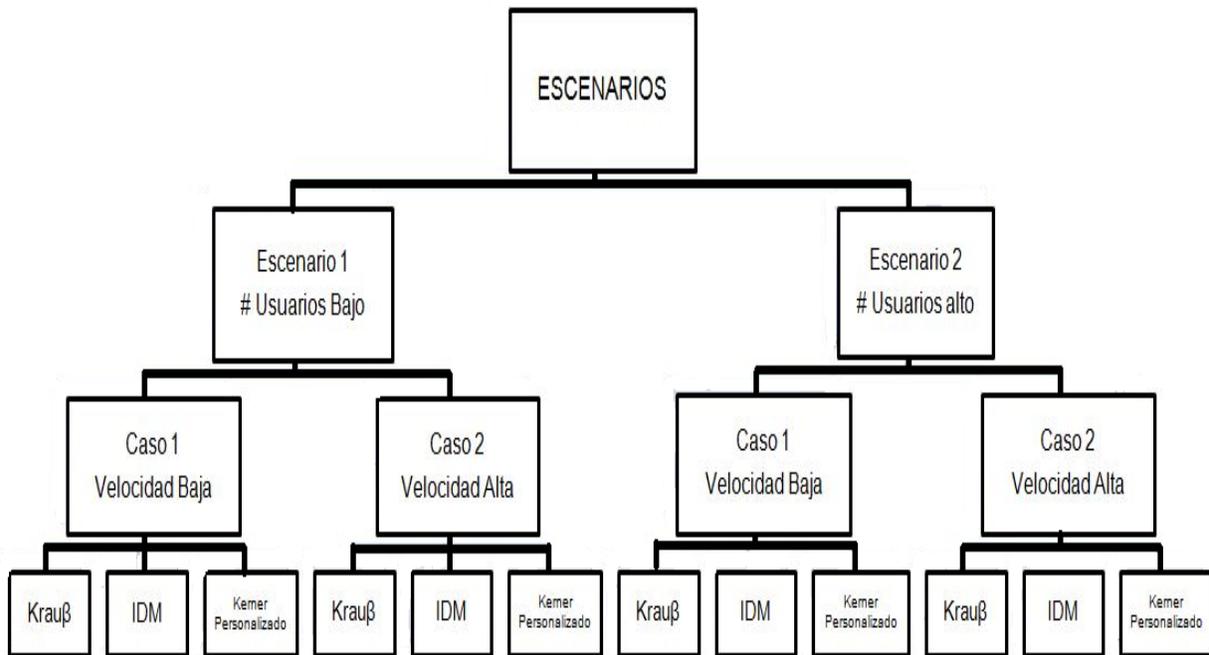


Figura 3.1 Escenarios y casos a simular. Por los Autores.

Del mapa conceptual de la Figura 3.1 puede verse que los escenarios y casos a simular toman en consideración los mismos modelos de movilidad (Krauß, IDM y Kerner Personalizado). Debido a esto, a continuación se presenta una descripción de los parámetros de dichos modelos en las herramientas de simulación elegidas.

🧩 Modelo de Krauß

Descrito en el capítulo II sección 2.3.1, el modelo de Krauß implementado en SUMO considera las variables “accel”, “decel”, “sigma” y “minGap”, mostradas en la Figura 3.2. Los valores de éstas variables propias del modelo de Krauß se tomaron de [92], los cuales fueron ajustados al simulador con la colaboración directa²² de Stefan Krauß.

```

<vtype id="vt1" length="6" width="2.5" accel="0.8" decel="4.5" sigma="0.5" maxspeed="8.5" guiShape="bus"/>
<flow id="PRIMERO-NSB" from="132229954#2" to="60238747#0" begin="0" end="600" no="1" color="1,1,1" type="vt1"/>
  
```

Figura 3.2 Variables del modelo de Krauß.

La descripción de las variables que se muestran en la Figura 3.2 se presentan a continuación:

²² Stefan Krauß colaboró directamente al sugerir los valores de las variables mostradas en [92], mediante comunicación por correo electrónico.

- i. *id (vtype)*: nombre de la instancia donde se encuentran los parámetros del modelo de movilidad.
- ii. *length*: longitud neta del vehículo en metros.
- iii. *width*: ancho del vehículo en metros.
- iv. *accel*: aceleración del vehículo en $\frac{m}{s^2}$
- v. *decel*: desaceleración o frenado del nodo en $\frac{m}{s^2}$
- vi. *sigma*: grado de atención del conductor (de 0 a 1).
- vii. *maxspeed*: velocidad máxima que puede alcanzar el nodo.
- viii. *minGap*: espacio entre vehículos estacionarios (en intersecciones, cruces, etc.)
- ix. *guiShape*: tipo de vehículo a simular.
- x. *id (flow)*: nombre del flujo de vehículos.
- xi. *from/to*: punto de partida/llegada del vehículo en el mapa (en el Anexo C se especifica cómo obtener estos valores).
- xii. *begin/end*: tiempo en el que el nodo aparece/desaparece del mapa.
- xiii. *no*: número de vehículos presentes en el flujo.
- xiv. *color*: color del vehículo (ver tabla en Anexo C, sección 2.2)
- xv. *type*: función que llama a la instancia que contiene los parámetros del modelo de movilidad.

Modelo IDM

Para la simulación del modelo IDM se definieron los cuatro tipos de comportamiento característicos (ver Tabla 2.1, capítulo II) para los diversos tipos de vehículos simulados en SUMO. La Tabla 3.3 muestra la distribución de comportamientos dependiendo del tipo de vehículo.

TIPO DE VEHÍCULO	COMPORTAMIENTO
PASSENGER	AGRESIVO
PASSENGER/SEDAN	AGRESIVO
PASSENGER/HATCHBACK	AGRESIVO
PASSENGER/WAGON	NORMAL
PASSENGER/VAN	TÍMIDO
DELIVERY	NORMAL
EVEHICLE (VEHÍCULO ELÉCTRICO)	TÍMIDO
TRANSPORT	CAMIÓN
BUS	CAMIÓN
BUS PEQUEÑO	TÍMIDO

Tabla 3.3 Comportamiento de los nodos según el tipo de vehículo. Por los Autores.

Las variables que considera SUMO para el modelo IDM son “accel”, “decel”, “timeHeadWay” y “minGap”. Estas variables se describen en la Tabla 2.1 del capítulo II pero con distinta denominación así: “accel” es la aceleración (a); “decel” es el frenado (b); “timeHeadWay” es el tiempo espacial (T) y “minGap” es la distancia de seguridad (Δx_{min}). La Figura 3.3 muestra dichas variables en SUMO.

```
<vtype id="vt1" length="6" width="2.5" accel="0.7" decel="2" maxspeed="5.1607" minGap="4" timeHeadWay="2.0" guiShape="bus"><carFollowing-IDM/></vtype>
<flow id="PRIMERO-NSB" from="132229954#2" to="60238747#0" begin="0" end="600" no="1" color="1,1,1" type="vt1"/>
```

Figura 3.3 Variables del modelo IDM.

Modelo de Kerner Personalizado

Para la simulación de escenarios, el modelo Kerner descrito en el Capítulo II sección 2.3.2 se personalizó al añadir algunas características (“accel”, “decel”, “tau” y “minGap”) del modelo de Wagner. Los valores específicos se obtuvieron del autor del modelo (Peter Wagner) mediante un correo electrónico. La personalización se realizó debido a que se quiso analizar si el comportamiento de este modelo ofrece mejores resultados que los descritos previamente (Krauß e IDM). La Figura 3.4 muestra las variables propias de este modelo personalizado; además de las variables comunes a todos los modelos de movilidad y propias de los nodos.

```
<vtype id="vt1" length="6" width="2.5" accel="1.4" decel="2" maxspeed="8.5" minGap="0.5" tau="1.5" guiShape="bus"><carFollowing-BKerner/></vtype>
<flow id="PRIMERO-NSB" from="132229954#2" to="60238747#0" begin="0" end="600" no="1" color="1,1,1" type="vt1"/>
```

Figura 3.4 Variables del modelo de Kerner personalizado.

La variable “tau” presente en la Figura 3.4 es el tiempo de reacción (en segundos) frente a algún evento imprevisto.

La caracterización de los anteriores modelos de movilidad en las herramientas de simulación se hizo para cada escenario y caso, variando la velocidad y el número de nodos presentes. Se presenta una descripción acerca de dichos escenarios y casos.

3.3.1.1. Escenario 1: número de usuarios bajo

Para este escenario, el número total de vehículos que circulan a través del mapa durante el tiempo de simulación es de 51 vehículos, incluyendo cuatro buses que realizan paradas programadas²³ en los sitios previamente especificados. Los restantes 47 nodos están distribuidos como lo muestra la Tabla 3.4.

²³ Los buses realizan paradas programadas en sitios específicos del área seleccionada de simulación. Ver Anexo C Sección C.2.2.

TIPO DE VEHÍCULO	CANTIDAD DE VEHÍCULOS
PASSENGER	7
PASSENGER/SEDAN	6
PASSENGER/HATCHBACK	8
PASSENGER/WAGON	5
PASSENGER/VAN	4
DELIVERY	5
EVEHICLE	4
TRANSPORT	3
BUS	2
BUS PEQUEÑO	3
TOTAL	47

Tabla 3.4 Distribución de vehículos en el Escenario 1. Por los Autores.

3.3.1.2. Escenario 2: número de usuarios alto

Para este escenario, la cantidad de nodos presentes en la simulación aumenta a 172 vehículos, además de cuatro buses que realizan paradas programadas (como en el escenario anterior). La Tabla 3.5 muestra la distribución de éstos 172 nodos en relación al tipo de vehículo.

TIPO DE VEHÍCULO	CANTIDAD DE VEHÍCULOS
PASSENGER	25
PASSENGER/SEDAN	20
PASSENGER/HATCHBACK	24
PASSENGER/WAGON	20
PASSENGER/VAN	25
DELIVERY	20
EVEHICLE	12
TRANSPORT	14
BUS	6
BUS PEQUEÑO	6
TOTAL	172

Tabla 3.5 Distribución de vehículos en el escenario 2. Por los Autores.

Según la Figura 3.1, los escenarios descritos anteriormente comparten los dos casos presentes (nodos con velocidad baja y alta respectivamente). Por lo que, se presenta una descripción acerca de dichos casos.

▪ **Caso 1. Velocidad baja**

Para este caso se maneja una velocidad máxima alcanzable por los nodos de 8.5 m/s, lo que equivale a 30.6 km/h. Esta velocidad está basada en estudios realizados por la Secretaría de Tránsito Municipal de la ciudad de Popayán, en donde se afirma que la velocidad mínima promedio de los vehículos que circulan por la zona en estudio es de 30 km/h [93].

Dado que el modelo IDM presenta cuatro distintos comportamientos de conductores como lo muestra la Tabla 2.1 del capítulo II, se hizo necesaria una adaptación de la velocidad para los conductores, como lo muestra la Tabla 3.6. Para los modelos de Krauß y Kerner personalizado no hubo necesidad alguna de adaptar las velocidades, ya que estos modelos manejan un único tipo de comportamiento para los conductores.

VELOCIDAD DE CONDUCTORES AGRESIVOS DE REFERENCIA	140 KM/H	140 → 100%
VELOCIDAD DE CONDUCTORES NORMALES DE REFERENCIA	120 KM/H	120 → X $X = \frac{120}{140} \times 100\%$ $X = \frac{6}{7}$
VELOCIDAD DE CONDUCTORES TÍMIDOS DE REFERENCIA	100 KM/H	140 → 100% 100 → Y $Y = \frac{100}{140} \times 100\%$ $Y = \frac{5}{7}$
VELOCIDAD DE CONDUCTORES DE CAMIÓN DE REFERENCIA	85 KM/H	140 → 100% 185 → Z $Z = \frac{85}{140} \times 100\%$ $Z = \frac{17}{28}$

Tabla 3.6 Relación entre velocidades para IDM. Por los Autores.

Una vez obtenidas las relaciones entre velocidades, se toma la velocidad máxima para el caso 1 (8.5m/s) como velocidad de conductores agresivos. Para obtener la velocidad de los demás comportamientos de conductores se multiplica esta velocidad máxima con los factores X, Y y Z encontrados en la Tabla 3.6. Estos nuevos valores se muestran en la Tabla 3.7.

NUEVA VELOCIDAD DE CONDUCTORES AGRESIVOS	$8.5 \frac{m}{s}$
NUEVA VELOCIDAD DE CONDUCTORES NORMALES	$8.5 \times \frac{6}{7} = 7.28 \frac{m}{s}$
NUEVA VELOCIDAD DE CONDUCTORES TÍMIDOS	$8.5 \times \frac{5}{7} = 6.07 \frac{m}{s}$
NUEVA VELOCIDAD DE CONDUCTORES DE CAMIÓN	$8.5 \times \frac{17}{28} = 5.16 \frac{m}{s}$

Tabla 3.7 Velocidades adaptadas para IDM (caso 1). Por los Autores.

▪ **Caso 2: Velocidad alta**

Para el caso de velocidad alta, se consideró una velocidad máxima de 17 m/s (61.2 km/h) alcanzable por los nodos en el área de simulación. Al igual que el caso 1, este valor de velocidad está basado en los estudios descritos en [93]. Para los modelos de Krauß y Kerner Personalizado fue la única variable que se modificó, mientras que para el modelo IDM se requirió una nueva adaptación.

El modelo IDM con velocidad alta también se rige por los datos de la Tabla 3.6 pero, a diferencia del modelo IDM con velocidad baja, se requiere calcular de nuevo las velocidades relativas de cada tipo de comportamiento a la máxima alcanzable en el caso 2. Por esta razón los datos de la Tabla 3.6 y, en especial, las relaciones presentes en ella son las mismas para este caso. La Tabla 3.8 muestra los valores adecuados para este caso.

NUEVA VELOCIDAD DE CONDUCTORES AGRESIVOS	$17 \frac{m}{s}$
NUEVA VELOCIDAD DE CONDUCTORES NORMALES	$17 \times \frac{6}{7} = 14.57 \frac{m}{s}$
NUEVA VELOCIDAD DE CONDUCTORES TÍMIDOS	$17 \times \frac{5}{7} = 12.14 \frac{m}{s}$
NUEVA VELOCIDAD DE CONDUCTORES DE CAMIÓN	$17 \times \frac{17}{28} = 10.32 \frac{m}{s}$

Tabla 3.8 Velocidades adaptadas para IDM (caso 2). Por los Autores.

Es necesario destacar que, para cada escenario, caso y modelo de movilidad utilizado, se crearon diferentes archivos de simulación con el fin de evitar inconsistencias en el análisis de resultados.

3.3.2. Definición de las características de los escenarios de simulación

Con la descripción de los escenarios y casos de simulación, se procede a la definición de las características que abarcan desde el área de estudio hasta parámetros técnicos de capa Física y de capa MAC.

3.3.2.1. Área de estudio

Como primera medida se describe el área de estudio elegida para caracterizar y simular los escenarios con el fin de dar respuesta a la pregunta de investigación de este trabajo de grado. Se busca establecer el impacto de la velocidad y modelo de movilidad en una comunicación de datos de una red vehicular, por lo que es necesario establecer como área un sector de la ciudad de Popayán para brindar realismo a las simulaciones realizadas.

Es por esto que, para la elección del área de estudio se pensó en un sitio particular en donde el flujo de vehículos fuera elevado y tuviera características especiales (no únicamente una intersección o cruce). En consecuencia el lugar elegido para realizar las simulaciones fue la glorieta de Santa Clara, dado que en aquel lugar hay un conjunto de semáforos que controlan el flujo vehicular.

Además, en este punto de la ciudad los vehículos circulan con velocidades relativamente altas en comparación a otros y son obligados a detenerse por los semáforos. Asimismo el sitio presenta diez puntos de intersección de entrada y salida de vehículos a la glorieta, lo que lo hace ideal para analizar el impacto de la velocidad de los nodos sobre una comunicación de datos.

Desde otra perspectiva, el sitio permite analizar las variables que tienen en cuenta los modelos de movilidad descritos en la sección 2.3, como tiempos de reacción, tipo de vehículos, entre otras. Una imagen del área seleccionada se muestra en la Figura 3.5.



Figura 3.5 Glorieta de Santa Clara, área de simulación. Tomada de Google Earth.

El área de simulación descrita anteriormente se adecuó al simulador de tráfico SUMO. Este procedimiento se describe en el Anexo C sección C.2.1. La Figura 3.6 muestra dicha área desplegada en SUMO.

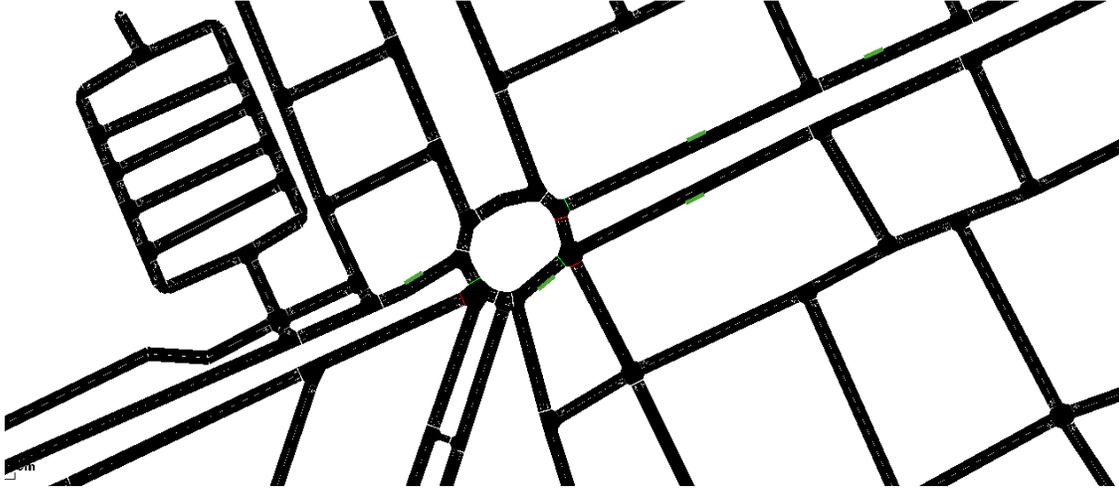


Figura 3.6 Área de simulación en SUMO.

3.3.2.2. Parámetros técnicos y aplicaciones

Para la simulación de escenarios y casos se definieron una serie de características técnicas junto con las aplicaciones a simular. Se caracterizó el escenario de comunicación V2V y, por ende, el dominio *ad hoc*, debido a que este escenario es uno de los más representativos para las redes VANET y, por las características del área de simulación (la probabilidad de accidentes es mayor dado el alto número de cruces) se enfatizó en aplicaciones de seguridad.

Dado el enfoque de este trabajo de grado se utilizó el Protocolo de Mensajes de Onda Corta (WSMP: *Wave Short Message Protocol*) como protocolo de transporte, además la velocidad de transmisión de datos se establece en 6 Mbps, como lo indican los autores en [94] guiados por el estándar IEEE 802.11p. Además la tasa de codificación es $\frac{1}{2}$ y se utiliza Modulación en Cuadratura por Desplazamiento de Fase (QPSK: *Quadrature Phase Shift Keying*).

Con los datos de sensibilidad de receptores, potencia de transmisión y frecuencia de operación, al realizar un balance del enlace se pudo determinar la máxima distancia a la cual los vehículos pueden comunicarse entre sí. La ecuación²⁴ (5) describe este procedimiento.

$$U_{rx} + \frac{S}{N} = P_{tx} - L_{fs} \quad (5)$$

²⁴ El valor de S/N en la ecuación (5) se tomó de [74] y hace referencia al margen de desvanecimiento, en donde el autor se basa en apreciaciones teóricas que indican que para redes de la familia 802.11, 10 dB son suficientes como margen.

$$-89 \text{ dBm} + 10 \text{ dB} = 13 \text{ dBm} - [32.45 + 20 \log d + 20 \log f_{\text{MHz}}]$$

$$d = 0.161 \text{ km} = 161 \text{ m}$$

Del resultado anterior se puede inferir que la distancia máxima que se alcanza en una comunicación entre nodos es 161 metros. Si los nodos se encuentran a una distancia mayor, no reciben información alguna, por lo que en los resultados de la simulación no aparecen errores de transmisión ni recepción.

Para los escenarios y casos descritos en este trabajo de grado, las únicas pérdidas relevantes que sufre la señal inalámbrica son las pérdidas de espacio libre, no se consideran pérdidas por desvanecimiento ni conectores debido a que el trabajo no se enfoca en la caracterización de los fenómenos que afectan las señales inalámbricas como desvanecimiento, multitrayectoria e interferencia, entre otros.

Como se dijo anteriormente, para la simulación de escenarios se eligieron aplicaciones de seguridad, las cuales consisten en alarmas por accidentes de tránsito ya sucedidos, alertas por posibles accidentes de tránsito y control inteligente del flujo de tráfico vehicular. De acuerdo a [95], estas aplicaciones presentan diferentes latencias máximas y tamaños de paquete de datos. La Tabla 3.9 resume las principales características de las aplicaciones simuladas.

APLICACIONES DE SEGURIDAD			
APLICACIÓN	ALARMAS POST-ACCIDENTES DE TRÁNSITO	ALERTAS POR POSIBLES ACCIDENTES DE TRÁNSITO	CONTROL INTELIGENTE DEL FLUJO DE TRÁFICO VEHICULAR
CARACTERÍSTICA			
MODO DE OPERACIÓN	HALF-DUPLEX	HALF-DUPLEX	HALF-DUPLEX
TIPO DE MENSAJE	BROADCAST	BROADCAST	BROADCAST
LATENCIA MÁXIMA	500 ms	100 ms	1000 ms
DATOS A TRANSMITIR/RECIBIR	POSICIÓN, DIRECCIÓN Y ESTADO DEL VEHÍCULO	POSICIÓN, VELOCIDAD Y ACELERACIÓN DEL VEHÍCULO	POSICIÓN, VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DE VIAJE DEL VEHÍCULO
MTU (Bytes)	21.5 (para vehículos estacionados) 32.875 (para vehículos en movimiento)	52.375	108

Tabla 3.9 Características de las aplicaciones simuladas. Por los Autores.

Un resumen de los parámetros y características técnicas de los escenarios y casos de simulación se muestra en la Tabla 3.10.

CARACTERÍSTICAS	
FRECUENCIA	5.89 GHz
POTENCIA DE TRANSMISIÓN	20 mW (13 dBm)
SENSIBILIDAD DE RECEPTORES	-89 dBm
UMBRAL DE RUIDO TÉRMICO	-110 dBm
RELACIÓN SEÑAL A RUIDO	10 dB
TASA DE BITS	6 Mbps
MODULACIÓN	QPSK
TASA DE CODIFICACIÓN	½
ESCENARIO DE COMUNICACIÓN	V2V
ESTÁNDAR	IEEE 802.11p
PROTOCOLO DE TRANSPORTE	WSMP
APLICACIONES SIMULADAS	ALARMA POST-ACCIDENTE DE TRÁNSITO, ALERTA POR POSIBLE ACCIDENTE Y CONTROL DE FLUJO DE TRÁFICO
TIPOS DE VEHÍCULOS SIMULADOS	LOS DESCRITOS EN LA TABLA 3.2 .

Tabla 3.10 Características y parámetros técnicos de los escenarios y casos. Por los Autores.

3.3.3. Ejecución de las pruebas de simulación

La ejecución de las pruebas de simulación se realizó utilizando los simuladores previamente elegidos: SUMO para la simulación del tráfico vehicular, OMNeT++ como plataforma para la implementación de la comunicación de datos y Veins como marco de simulación que los integra. Los nodos circulan por el área de estudio durante un tiempo de 600 segundos y transmiten información de tipo *broadcast* en instantes específicos. Se realizaron 5 iteraciones por cada escenario, caso y modelo de movilidad simulado.

3.3.4. Análisis de resultados

Para el análisis de resultados se tomó como base los datos obtenidos desde el simulador de red OMNeT++ relacionados con pérdida de paquetes, velocidad, aceleración y otros parámetros de cada escenario, caso y modelo de movilidad utilizado. Se presentan inicialmente resultados para un número determinado de nodos para luego comparar dichos datos con los casos contenidos en el escenario 2 y, así analizar el impacto que pueda llegar a tener la velocidad y el modelo de movilidad en una comunicación de datos de una VANET.

3.3.4.1. Impacto del modelo de movilidad

Para analizar el impacto del modelo de movilidad se tomaron como referentes de estudio cinco nodos elegidos aleatoriamente para estudiar individualmente el impacto que pueda llegar a tener la variación de éstos parámetros. Los nodos²⁵ elegidos fueron:

- ✓ Nodo 3
- ✓ Nodo 6
- ✓ Nodo 11
- ✓ Nodo 17
- ✓ Nodo 26

Considerando el mapa conceptual de la Figura 3.1, se realizó un análisis basado en los tres modelos de movilidad objeto de estudio para los cuatro casos y dos escenarios respectivamente con el fin de analizar cuál de los tres modelos es el que brinda mejor desempeño y comparar los modelos con mejores resultados.

a. Escenario 1, Caso 1

La Figura 3.7 muestra las velocidades de los cinco nodos en estudio para los modelos de Krauß, IDM y Kerner personalizado. Se observa que la velocidad máxima es alcanzada por todos los nodos utilizando los tres modelos. Los datos fuente para la generación de esta figura son proporcionados por SUMO, las gráficas presentadas son de naturaleza vectorial y describen la velocidad instantánea de los nodos en estudio, además la figura se obtiene de OMNeT++.

²⁵ Aunque el nombre de algunos nodos difiere al variar el modelo de movilidad, escenario y caso, los nodos que tengan la misma etiqueta de color corresponderán al mismo vehículo estudiado. Esto aplica para todas las graficas subsiguientes.

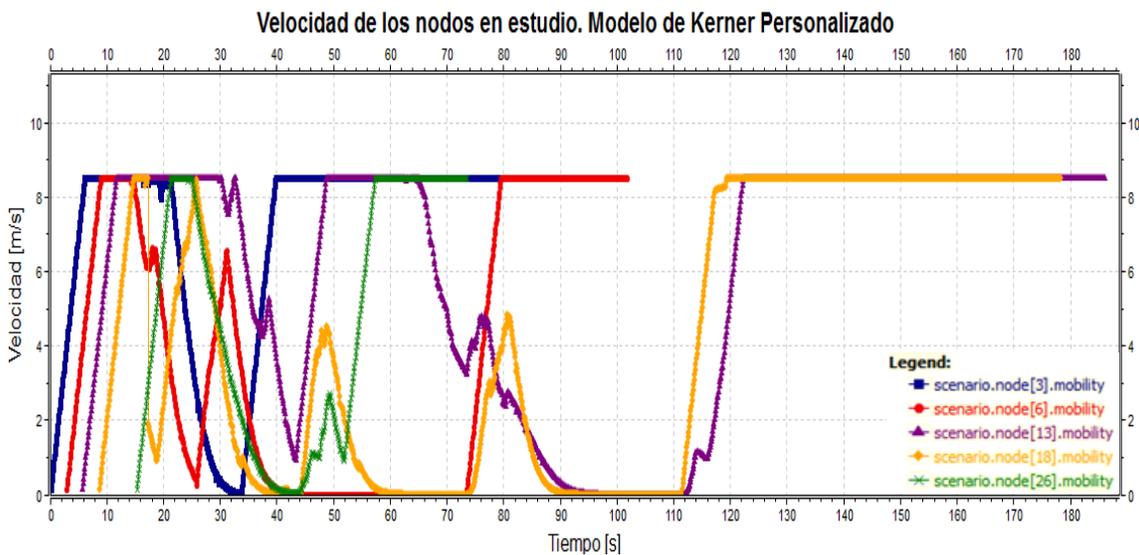
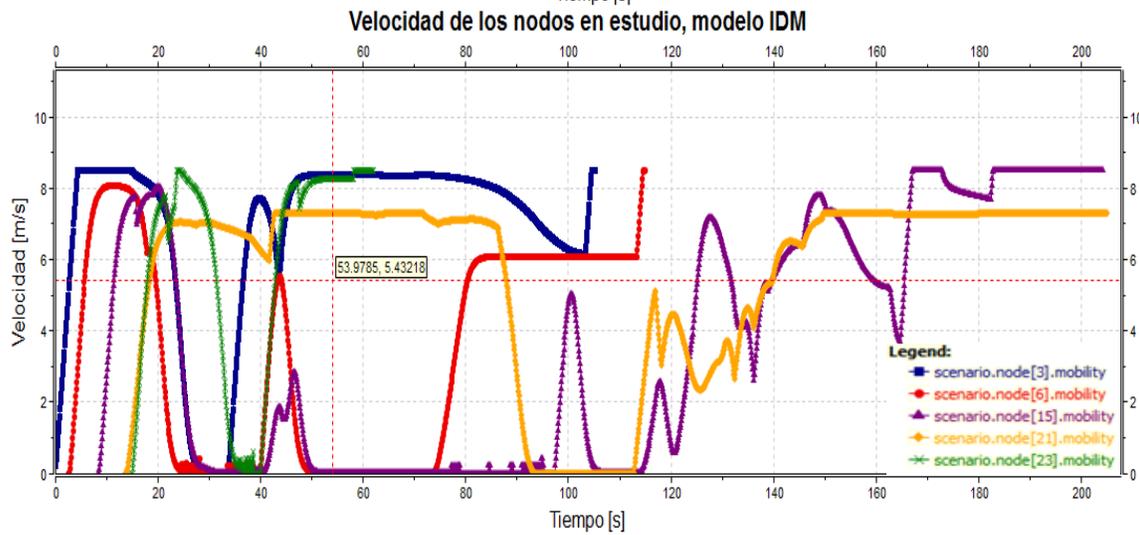
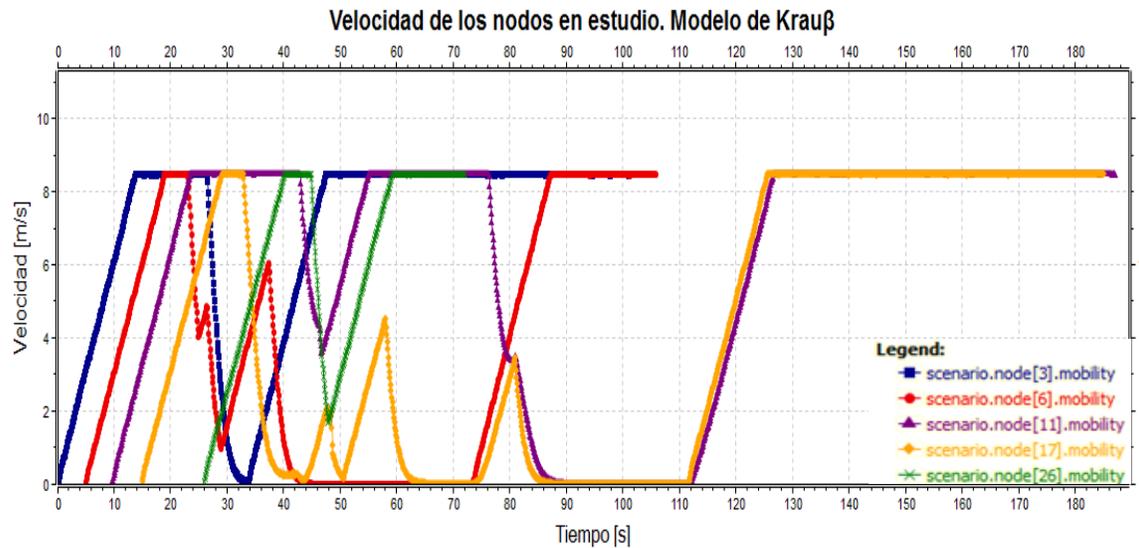


Figura 3.7 Velocidad de los nodos en estudio, escenario 1 caso 1

La Figura 3.8 muestra el tiempo de ocupación del canal por parte de los nodos en estudio bajo los tres modelos de movilidad. Este parámetro se hace relevante en cruces o intersecciones; en donde los vehículos pueden llegar a generar congestión vehicular, aumentando así el tiempo en el que el canal se encuentra ocupado y no disponible para otros vehículos. Por otra parte, en la Figura 3.9 se describe la cantidad de paquetes procesados por cada nodo.

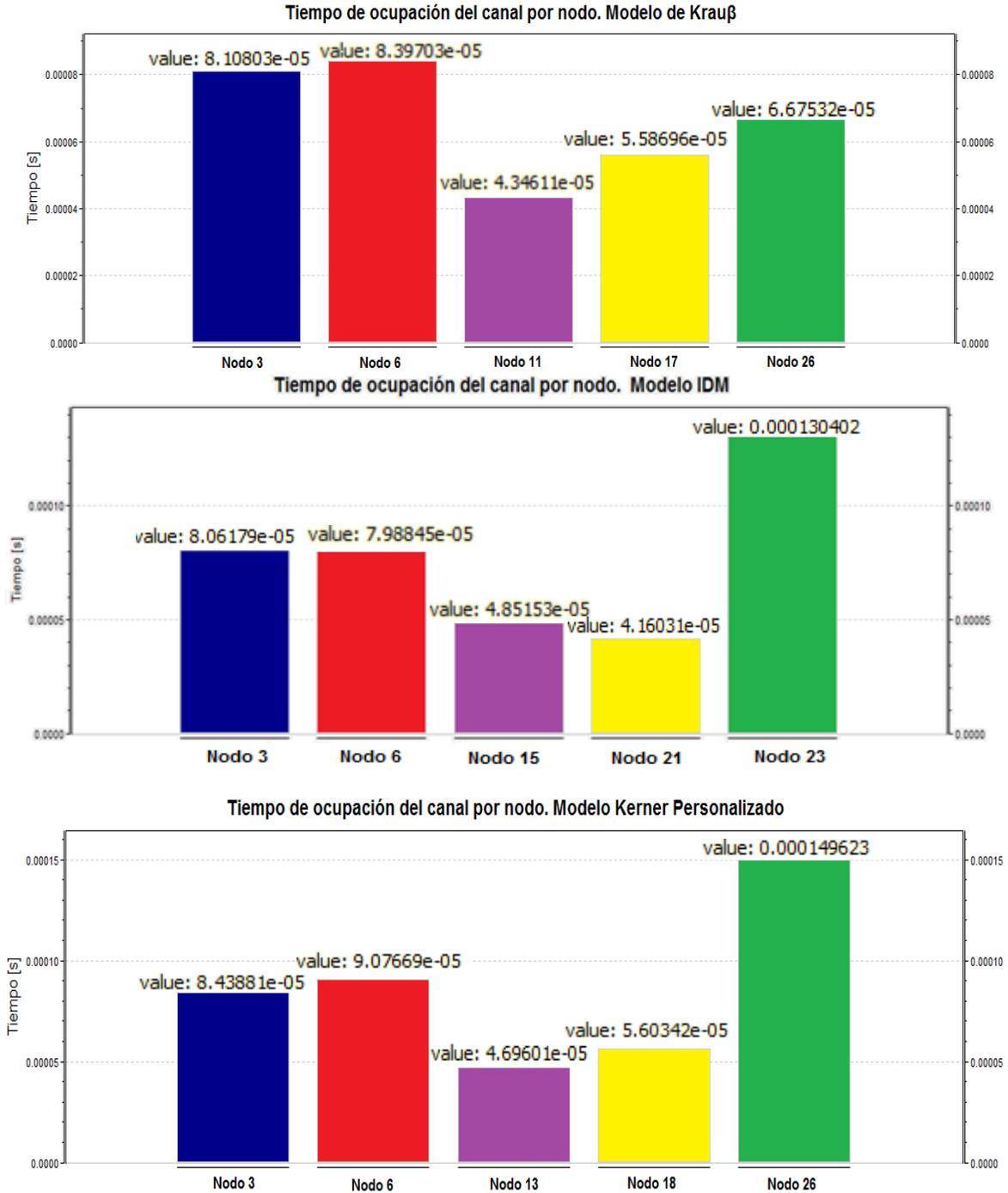


Figura 3.8 Tiempo de ocupación del canal por nodo, escenario 1 caso 1.

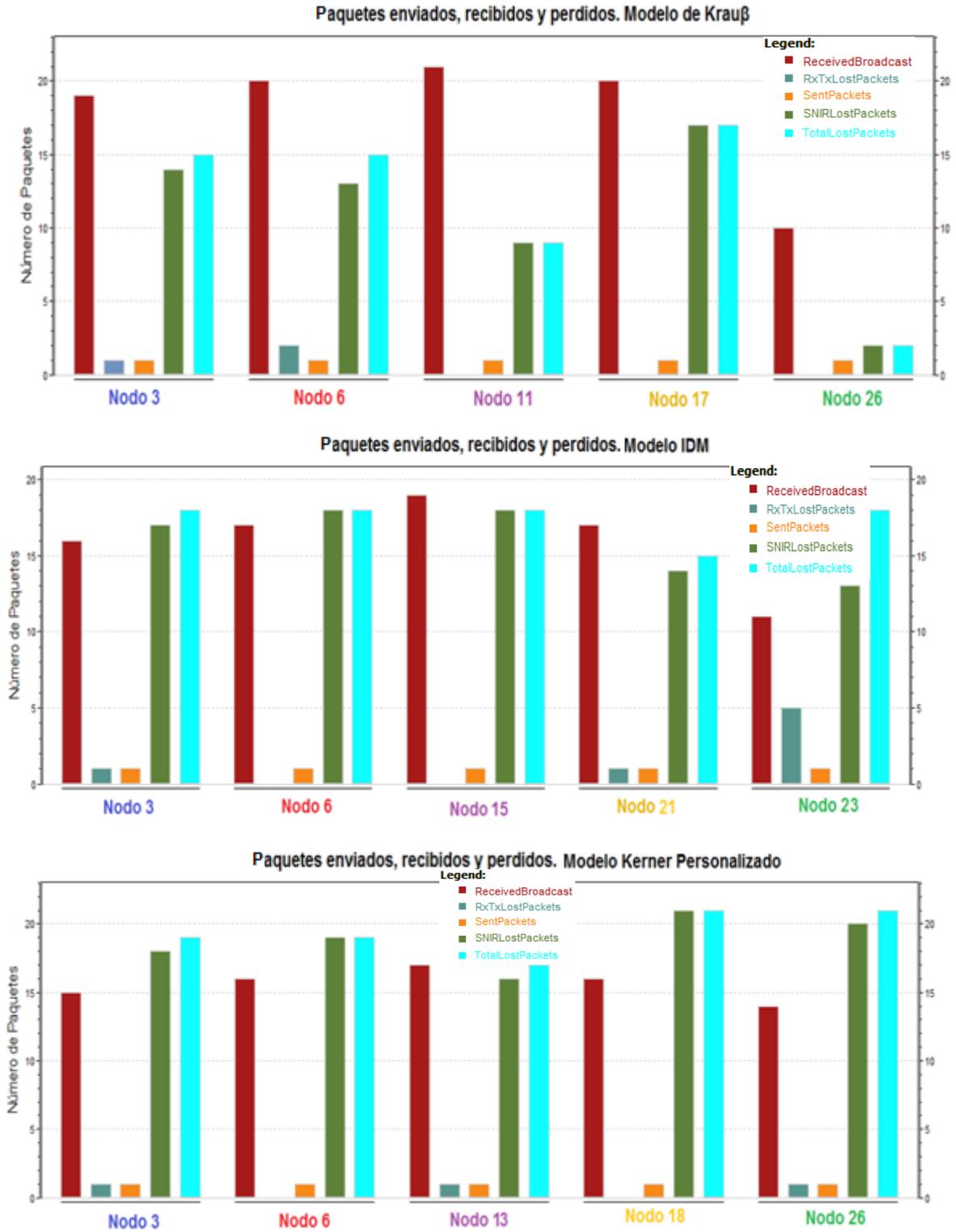


Figura 3.9 Paquetes procesados por nodo, escenario 1 caso 1.

En la leyenda de la Figura 3.9, los paquetes denominados “SentPackets” son los utilizados para la identificación de los nodos en la red VANET. Por otro lado, para un mejor análisis de los datos presentados en la Figura 3.9 y con el fin de identificar el modelo de movilidad con mejores resultados, se hace uso de la Tasa de Error de Paquete (PER: *Packet Error Rate*), la cual relaciona los paquetes errados o perdidos con el total de paquetes procesados por el nodo así:

$$PER = \frac{\text{Paquetes Errados}}{\text{Total de Paquetes Procesados}} \quad (6)$$

Para este caso, los paquetes errados hacen referencia a los denominados “TotalLostPackets” o paquetes totales perdidos, los cuales son la suma de los paquetes perdidos en el instante en que se estaba transmitiendo (RxTxLostPackets) más los paquetes con errores de bits (SNIRLostPackets). Por otra parte, los paquetes procesados son los paquetes errados más los paquetes de *broadcast*²⁶ recibidos (ReceivedBroadcast). La Tabla 3.11 muestra los diversos valores de PER para cada nodo y modelo de movilidad.

NODO	MODELO DE MOVILIDAD	PER	
3	KRAUß	0.441	
	IDM	0.529	
	KERNER PERSONALIZADO	0.559	
6	KRAUß	0.428	
	IDM	0.514	
	KERNER PERSONALIZADO	0.543	
11	KRAUß	0.300	
	IDM	0.486	
	KERNER PERSONALIZADO	0.500	
17	KRAUß	0.459	
	IDM	0.469	
	KERNER PERSONALIZADO	0.567	
26	KRAUß	0.167	
	IDM	0.621	
	KERNER PERSONALIZADO	0.600	

Tabla 3.11 Valores de PER por nodo, escenario 1 caso 1. Por los Autores.

Los datos de la Tabla 3.11 permiten concluir que el modelo de Krauß presenta mejores resultados para los cinco nodos en estudio, al tener un menor valor de PER en comparación a los otros dos modelos cuando el número de usuarios y la velocidad con la que circulan es baja

²⁶ Los paquetes que recibe cada nodo son de naturaleza *broadcast* dadas las aplicaciones que se simulan (gestión del tráfico, alertas por accidentes de tránsito sucedidos y alarmas por posibles accidentes).

b. Escenario 1, Caso 2

La Figura 3.10 muestra las gráficas de velocidad para los nodos en estudio, se observa que, a diferencia del caso anterior, algunos nodos no alcanzan la velocidad máxima configurada para este caso (17 m/s); lo que sí sucede cuando los nodos circulan con velocidad baja.

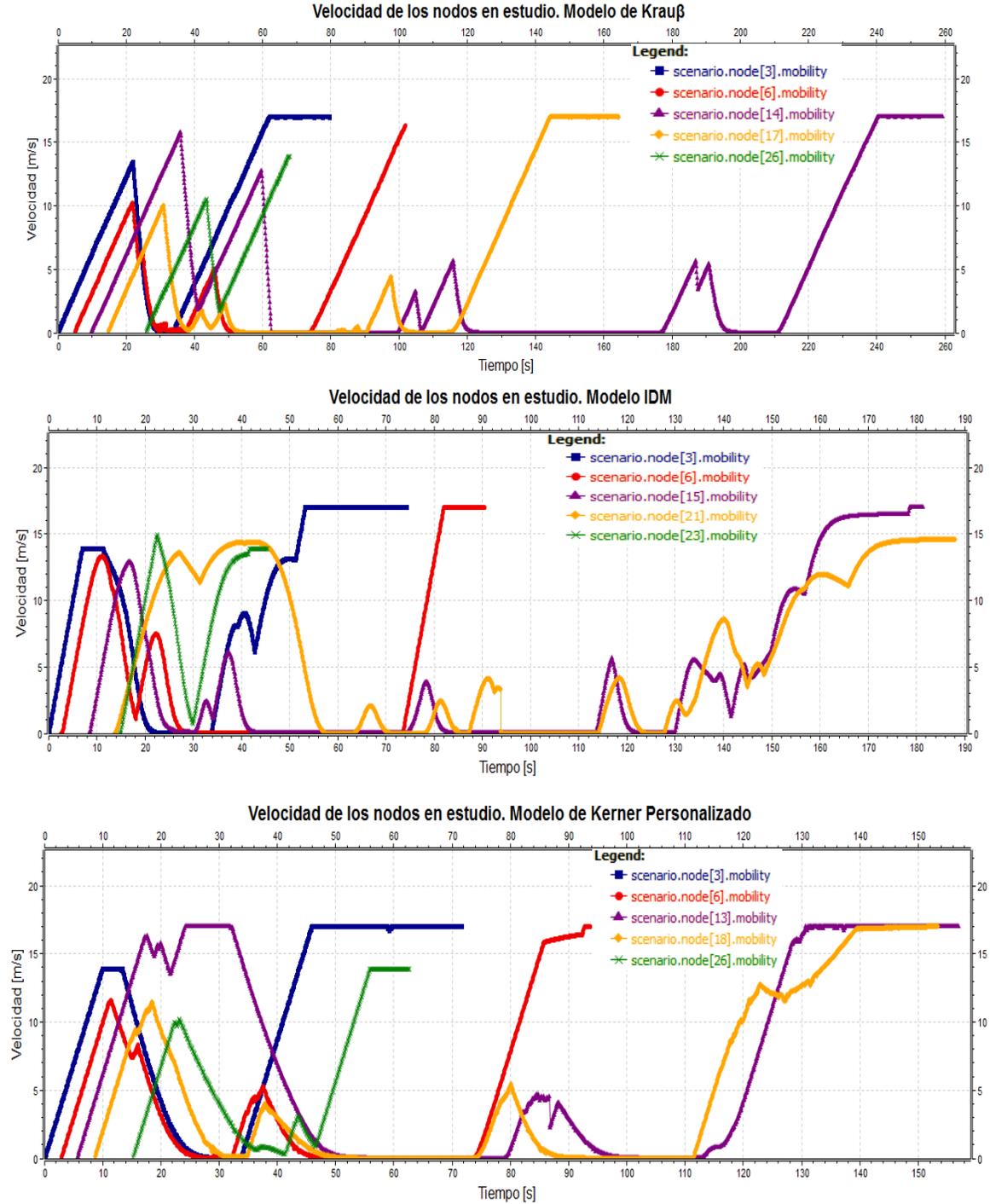


Figura 3.10 Velocidad de los nodos en estudio, escenario 1 caso 2.

Por otra parte, la Figura 3.11 muestra el tiempo de ocupación del canal para los nodos en estudio²⁷, mientras que la Figura 3.12 muestra los paquetes procesados y perdidos por nodo.

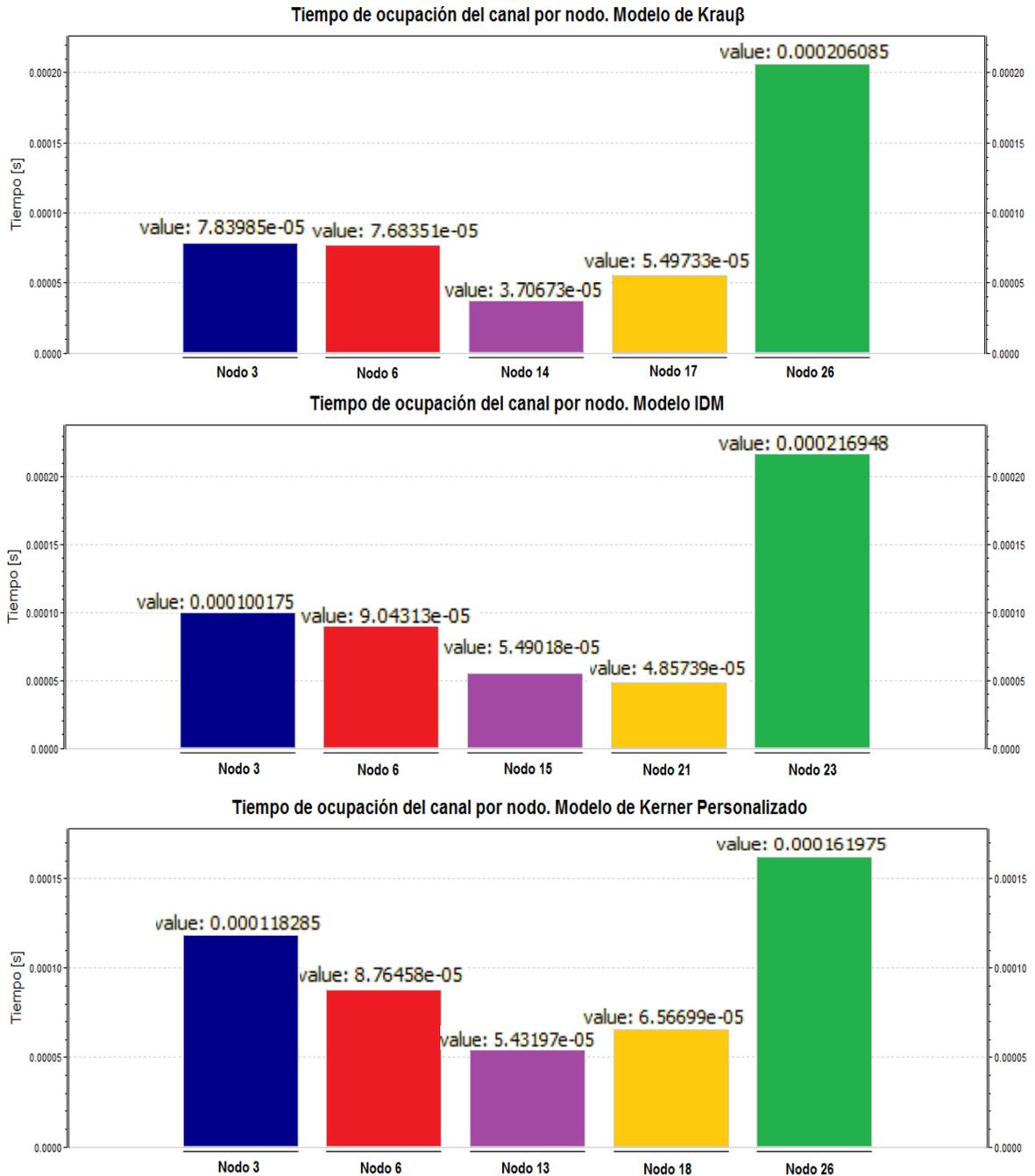


Figura 3.11 Tiempo de ocupación del canal por nodo, escenario 1 caso 2.

²⁷ El análisis del tiempo de ocupación del canal se hace con más énfasis en la sección 3.3.4.2.

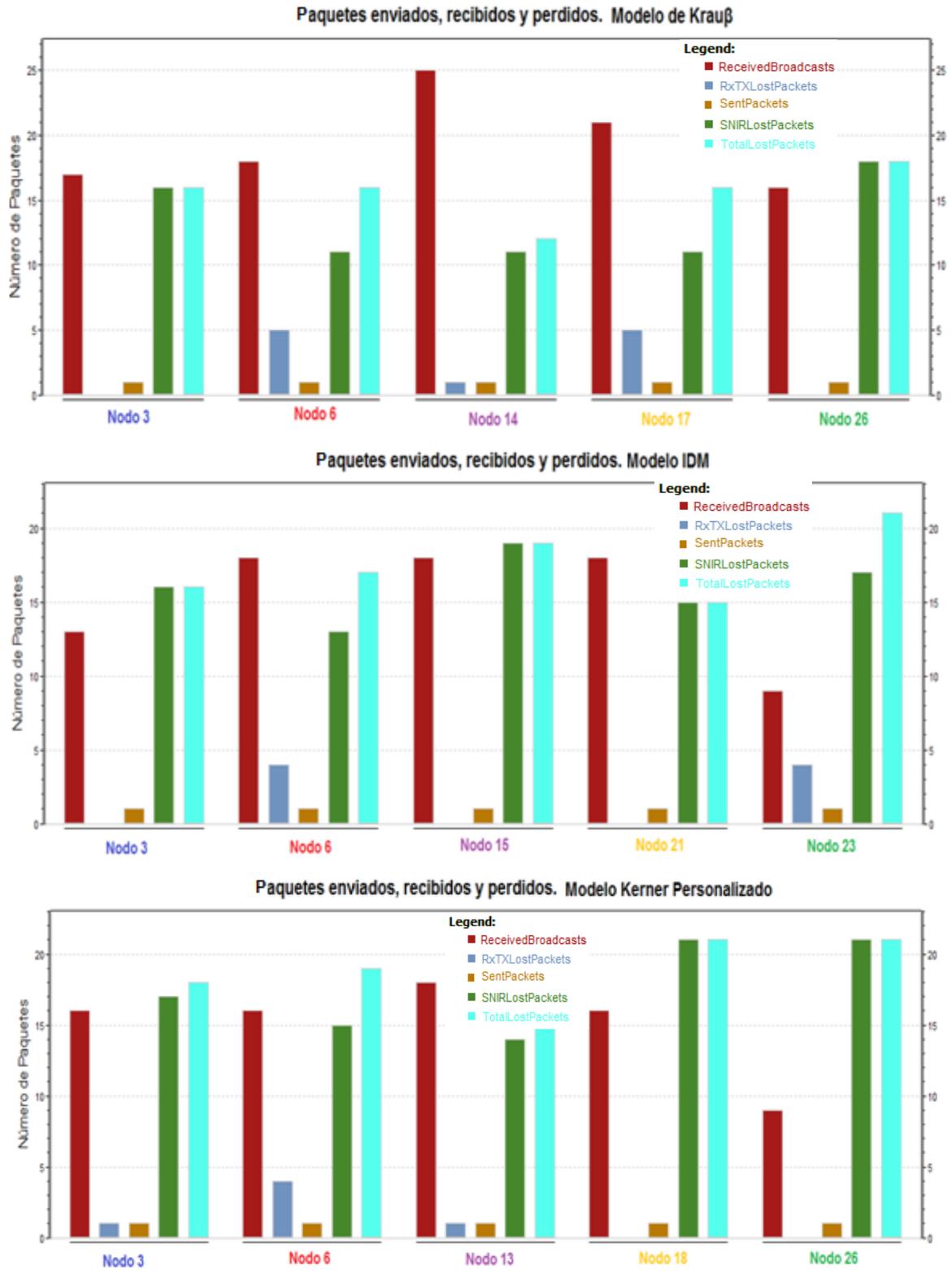


Figura 3.12 Paquetes procesados por nodo, escenario 1 caso 2.

Los datos presentados en la Figura 3.12 indican mediante el número de paquetes perdidos y recibidos el valor de PER para cada nodo y cada modelo de movilidad. Dichos datos se muestran en la Tabla 3.12.

NODO	MODELO DE MOVILIDAD	PER	
3	KRAUß	0.485	
	IDM	0.552	
	KERNER PERSONALIZADO	0.529	
6	KRAUß	0.470	
	IDM	0.486	
	KERNER PERSONALIZADO	0.543	
14	KRAUß	0.324	
	IDM	0.513	
	KERNER PERSONALIZADO	0.454	
17	KRAUß	0.432	
	IDM	0.454	
	KERNER PERSONALIZADO	0.567	
26	KRAUß	0.529	
	IDM	0.700	
	KERNER PERSONALIZADO	0.700	

Tabla 3.12 Valores de PER por nodo, escenario 1 caso 2. Por los Autores.

Los datos en la Tabla 3.12 muestran que el modelo de Krauß sigue siendo el que presenta mejor desempeño. Asimismo, comparando los valores de PER para el caso 1 y el caso 2, puede verse que el aumento de la velocidad produce un aumento en el valor de PER para los modelos de movilidad de Krauß e IDM. Por el contrario, el modelo de Kerner personalizado tiende a ser menos inmune a los cambios de velocidad de los nodos (el valor de PER se mantiene estable para los nodos 6 y 17 y disminuye para los nodos 3 y 14).

c. Escenario 2, Caso 1

Dado que en el escenario 2 se tiene un mayor número de nodos (176 en total), el identificador de los nodos en estudio varía considerablemente en relación al escenario 1. La equivalencia entre nodos para este segundo escenario es:

Nodo 3 ⇔ Nodo 30
Nodo 6 ⇔ Nodo 17
Nodo 14 ⇔ Nodo 15
Nodo 17 ⇔ Nodo 3
Nodo 26 ⇔ Nodo 41

La Figura 3.13 muestra la velocidad de los nodos equivalentes para el escenario 2.

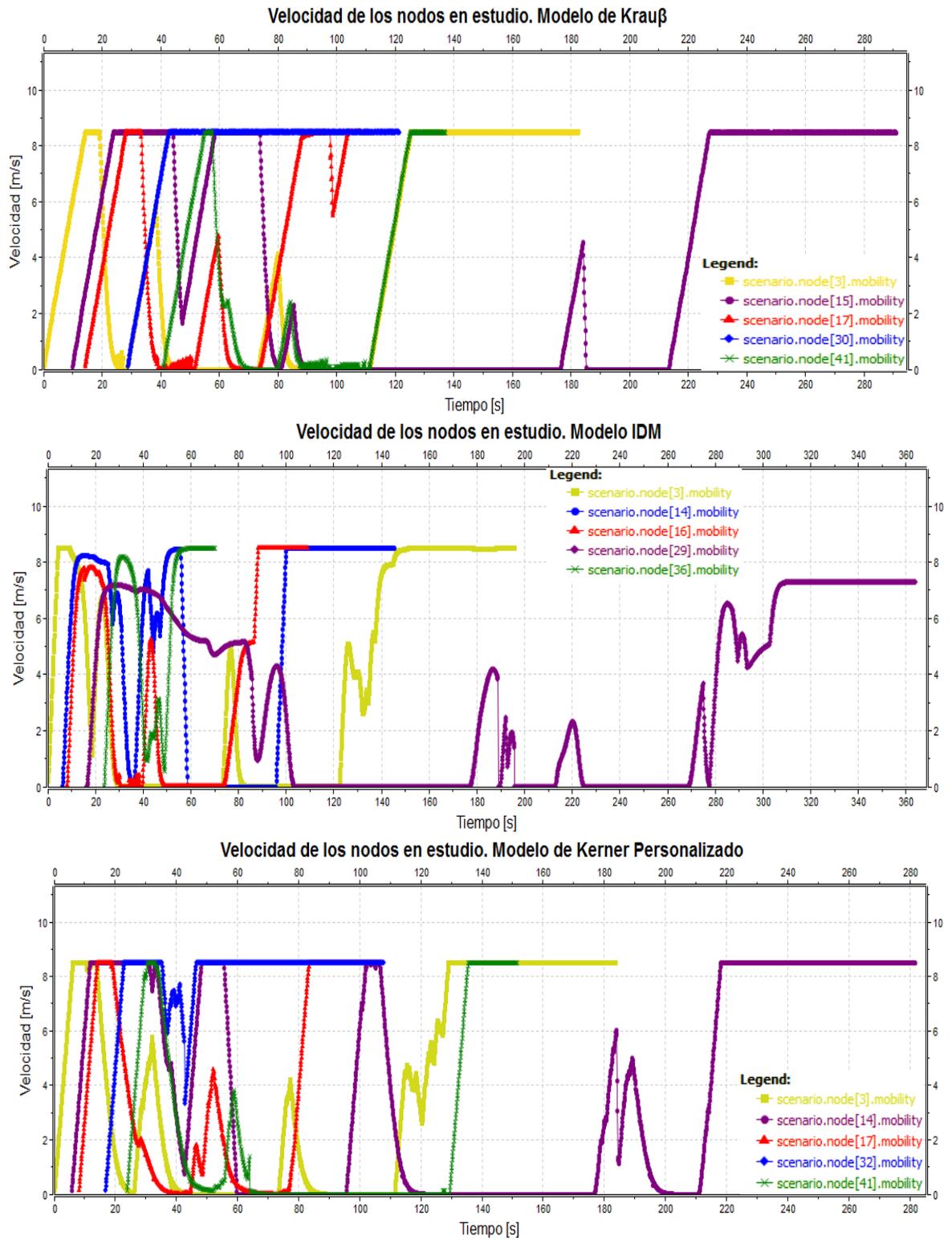


Figura 3.13 Velocidad de los nodos en estudio, escenario 2 caso 1.

Es necesario destacar que, en la Figura 3.13 para el modelo de movilidad IDM la leyenda de colores no sigue el mismo patrón en relación a los otros dos modelos. Esto se debe a que el nodo 14 (de color azul) en IDM es equivalente al nodo 30 en el modelo de Krauß y al nodo 32 en el modelo de Kerner personalizado. También es preciso insistir en que los colores de las gráficas de velocidad corresponden a los colores utilizados para el escenario 1 basándose en la equivalencia presentada en la página 56.

La Figura 3.14 muestra el tiempo de ocupación del canal para cada nodo y cada modelo de movilidad.

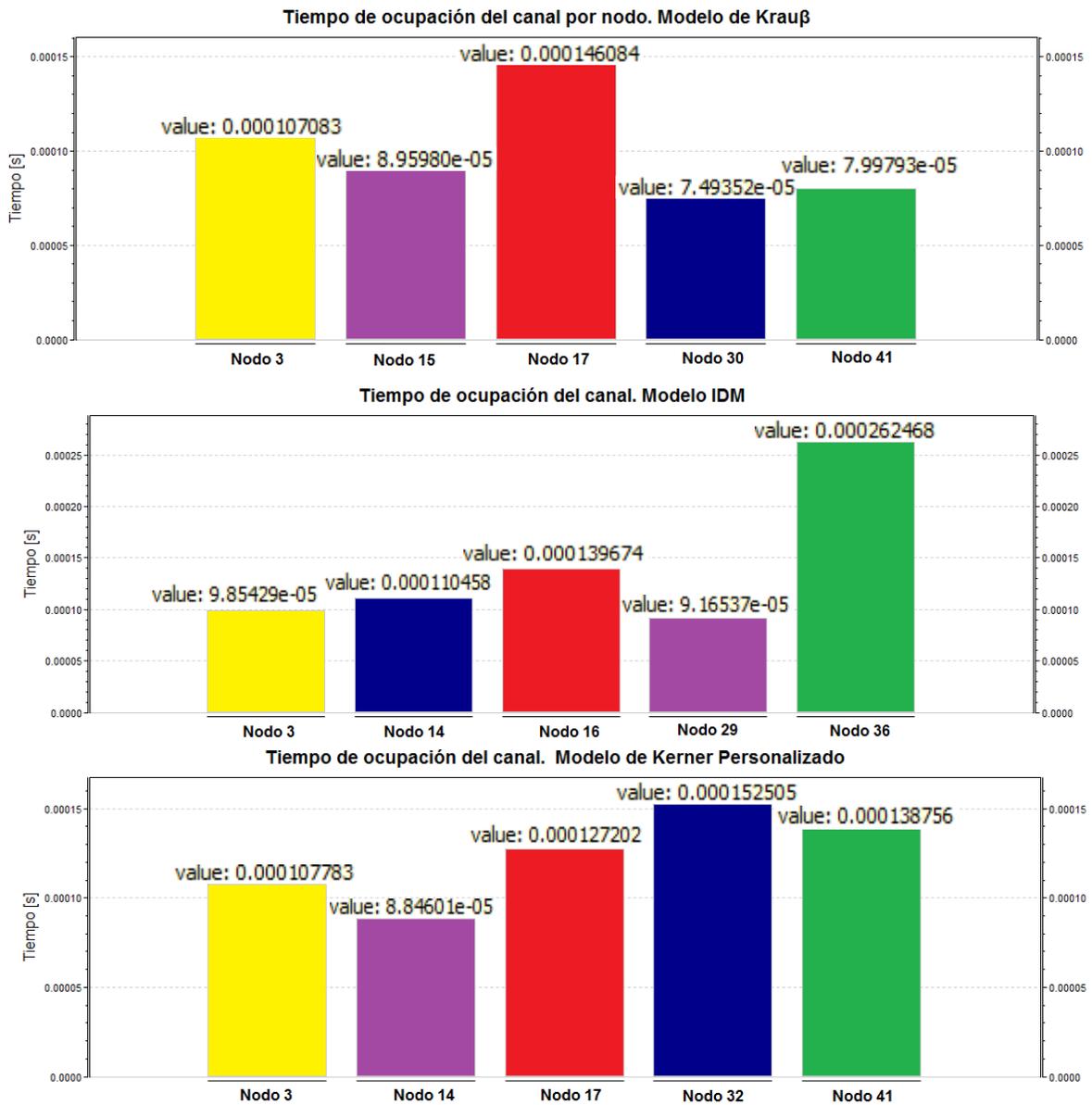


Figura 3.14 Tiempo de ocupación del canal por nodo, escenario 2 caso 1.

La Figura 3.15 muestra los paquetes enviados, recibidos y perdidos por nodo.

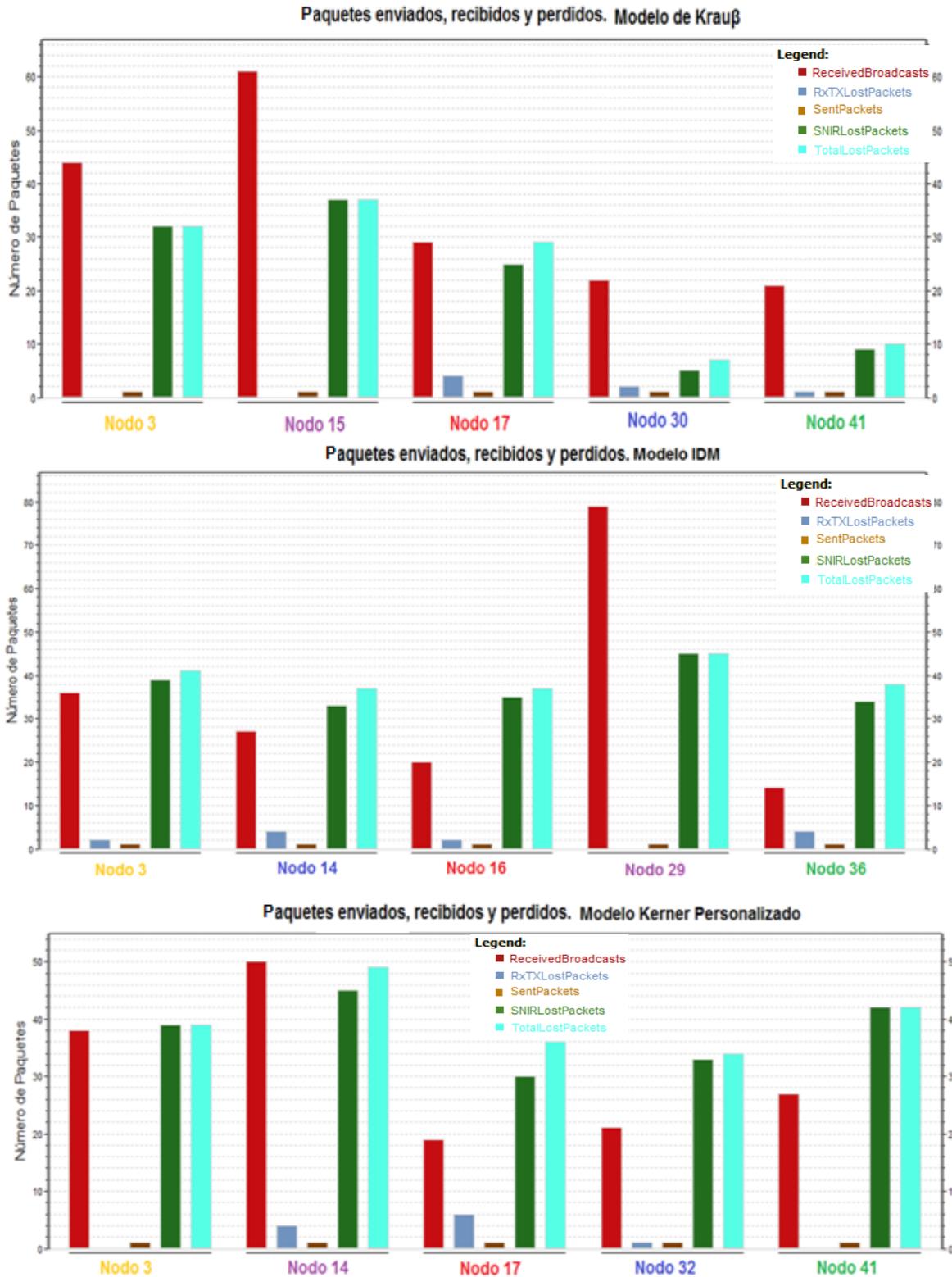


Figura 3.15 Paquetes procesados por nodo, escenario 2 caso 1.

Con los datos de la Figura 3.15 se obtiene el valor de PER para cada nodo y modelo de movilidad. La Tabla 3.13 muestra dichos resultados.

NODO	MODELO DE MOVILIDAD	PER	
30	KRAUß	0.241	
	IDM	0.363	
	KERNER PERSONALIZADO	0.618	
17	KRAUß	0.500	
	IDM	0.649	
	KERNER PERSONALIZADO	0.654	
15	KRAUß	0.377	
	IDM	0.578	
	KERNER PERSONALIZADO	0.495	
3	KRAUß	0.421	
	IDM	0.532	
	KERNER PERSONALIZADO	0.506	
41	KRAUß	0.322	
	IDM	0.730	
	KERNER PERSONALIZADO	0.609	

Tabla 3.13 Valores de PER por nodo, escenario 2 caso 1. Por los Autores.

El orden de los nodos en la Tabla 3.12 varía en comparación al escenario 1 debido a la equivalencia descrita en la página 56. Por esto se presenta el nodo 30 en primer lugar (dado que equivale al nodo 3 en el escenario 1).

Comparando los resultados de PER obtenidos en la Tabla 3.11 y en la Tabla 3.13 puede evidenciarse que el aumento en el número de usuarios incrementa el valor de PER para tres de cinco nodos que siguen el modelo de Krauß, aunque este modelo sigue siendo el de mejor desempeño en relación a los otros dos modelos. Para los modelos de Kerner Personalizado e IDM también se cumple que el aumento en el número de usuarios eleva el valor de PER, afectando el desempeño de los nodos que siguen dichos modelos.

d. Escenario 2, Caso 2

Conservando la equivalencia de nodos presentada en la página 56 de este documento, se muestra en la Figura 3.16 la velocidad de los nodos en estudio. Se observa que, al igual que en el escenario 1 caso 2, sólo en el modelo de Kerner Personalizado los cinco nodos alcanzan la velocidad máxima programada.

La Figura 3.17 muestra el tiempo de ocupación del canal por nodo para cada modelo de movilidad y la Figura 3.18 describe el resumen de paquetes procesados por nodo utilizando los tres modelos de movilidad analizados.

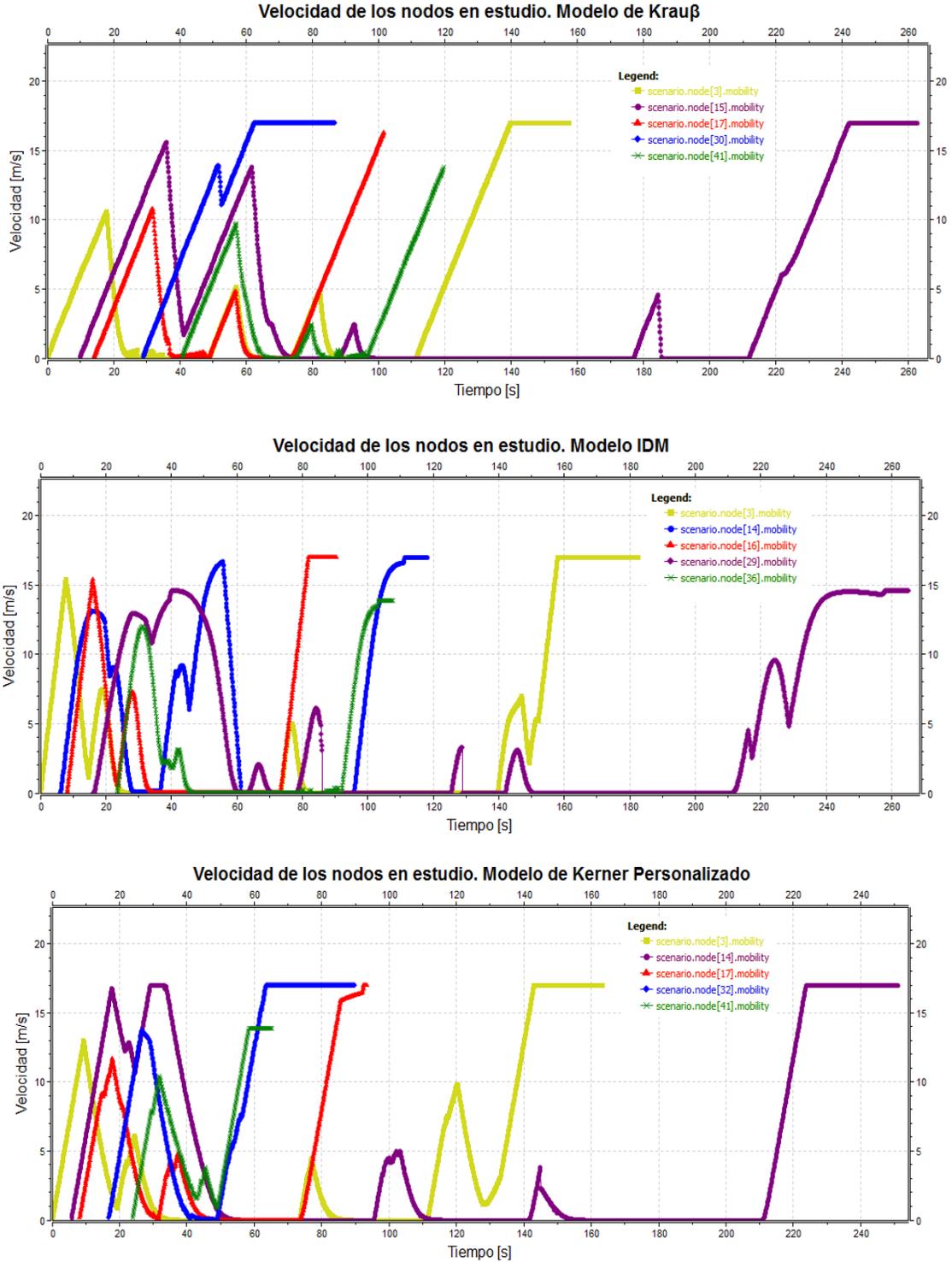


Figura 3.16 Velocidad de los nodos en estudio, escenario 2 caso 2.

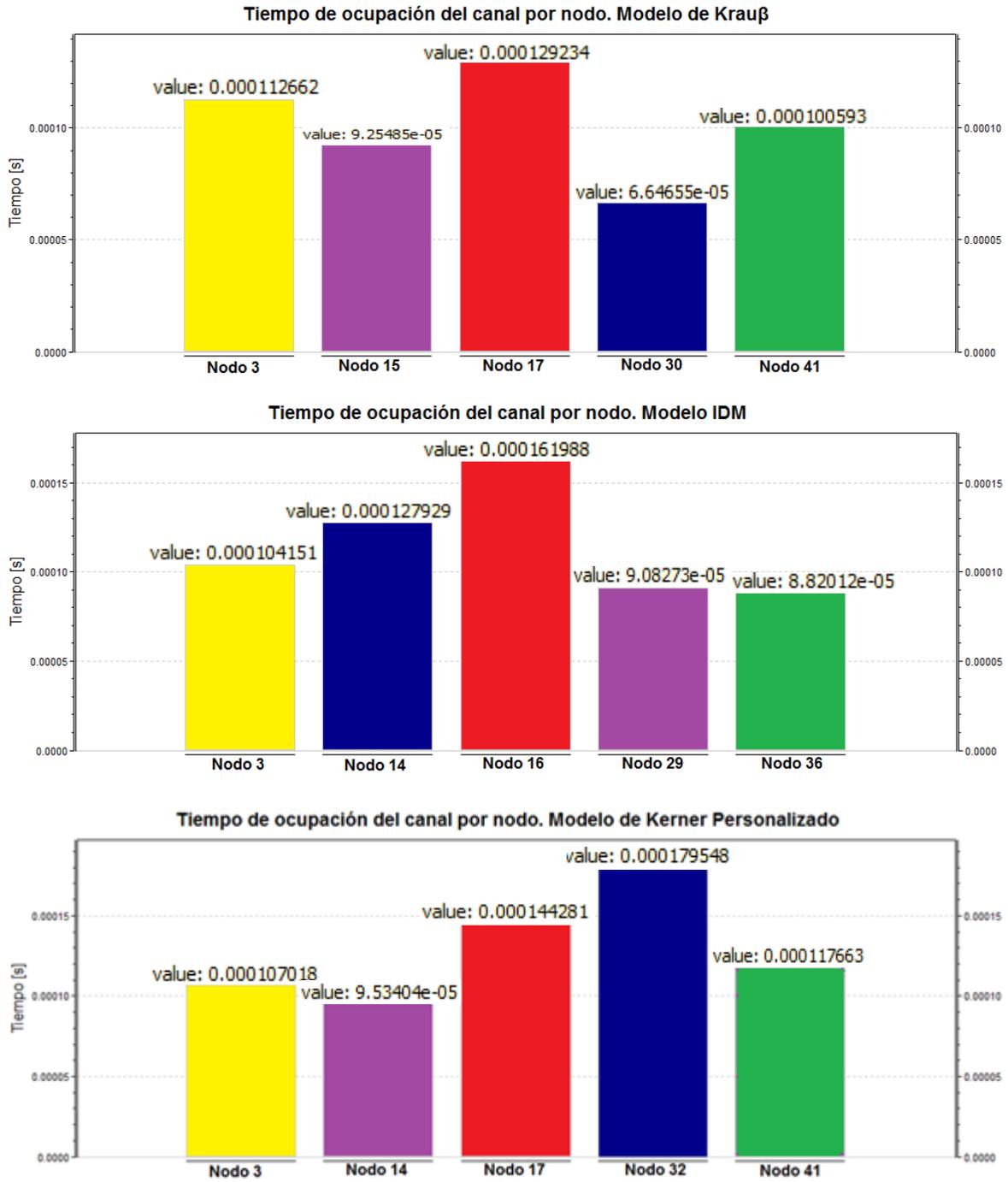


Figura 3.17 Tiempo de ocupación del canal por nodo, escenario 2 caso 2.

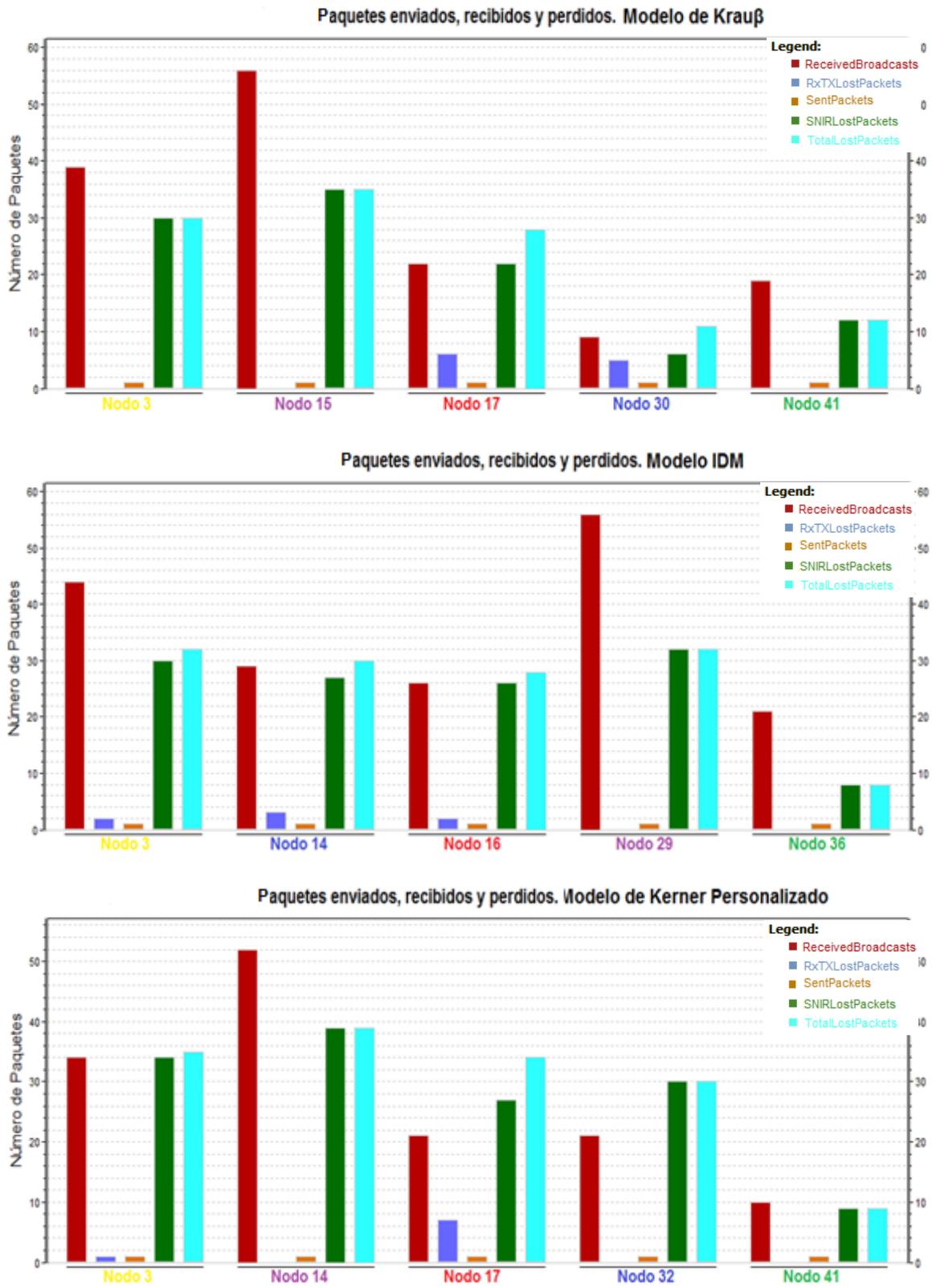


Figura 3.18 Paquetes procesados por nodo, escenario 2 caso 2.

Con los datos de la Figura 3.18 se calcula el valor de PER para este escenario y caso. Dichos valores se muestran en la Tabla 3.14.

NODO	MODELO DE MOVILIDAD	PER	
30	KRAUß	0.550	
	IDM	0.364	
	KERNER PERSONALIZADO	0.588	
17	KRAUß	0.560	
	IDM	0.518	
	KERNER PERSONALIZADO	0.618	
15	KRAUß	0.385	
	IDM	0.508	
	KERNER PERSONALIZADO	0.428	
3	KRAUß	0.435	
	IDM	0.421	
	KERNER PERSONALIZADO	0.507	
41	KRAUß	0.387	
	IDM	0.276	
	KERNER PERSONALIZADO	0.474	

Tabla 3.14 Valores de PER por nodo, escenario 2 caso 2. Por los Autores.

Analizando los resultados de la Tabla 3.14 se observa que el modelo de mejor desempeño es ahora el modelo IDM, ya que en 4 de 5 nodos presenta el menor valor de PER. Además teniendo en cuenta la variación en el número de usuarios y comparando los datos de la Tabla 3.12 con los datos de la Tabla 3.14 se observa que el valor de PER para el modelo de Krauß aumenta para tres de cinco nodos, lo que incide negativamente en el desempeño de dicho modelo cuando se presenta un elevado número de usuarios con velocidades altas. Para los modelos de Kerner Personalizado e IDM se observa una tendencia contraria a la anterior, al disminuir los valores de PER en comparación al escenario con alto número de usuarios a velocidades bajas.

En adición a esto, al comparar los datos de PER del escenario 2 caso 2 con los datos de PER del escenario 2 caso 1 (comparación de velocidades de los nodos) se presenta un peor desempeño para los nodos bajo el modelo de Krauß al aumentar el valor de PER cuando la velocidad de los nodos se incrementa. Mientras que para los modelos de Kerner Personalizado e IDM se presentó una disminución de la PER cuando la velocidad de los nodos se incrementó.

Los resultados analizados anteriormente están basados en nodos elegidos al azar con el fin de cuantificar el impacto del modelo de movilidad en una comunicación de datos de una VANET. Sin embargo, para un análisis más general se tomó en cuenta el número total de nodos que circularon por el área seleccionada para simulación. Se prestó atención especial a los paquetes recibidos y perdidos para obtener una comparación global entre los modelos de movilidad por medio de la PER. En la Figura 3.19 se muestra dicho análisis.

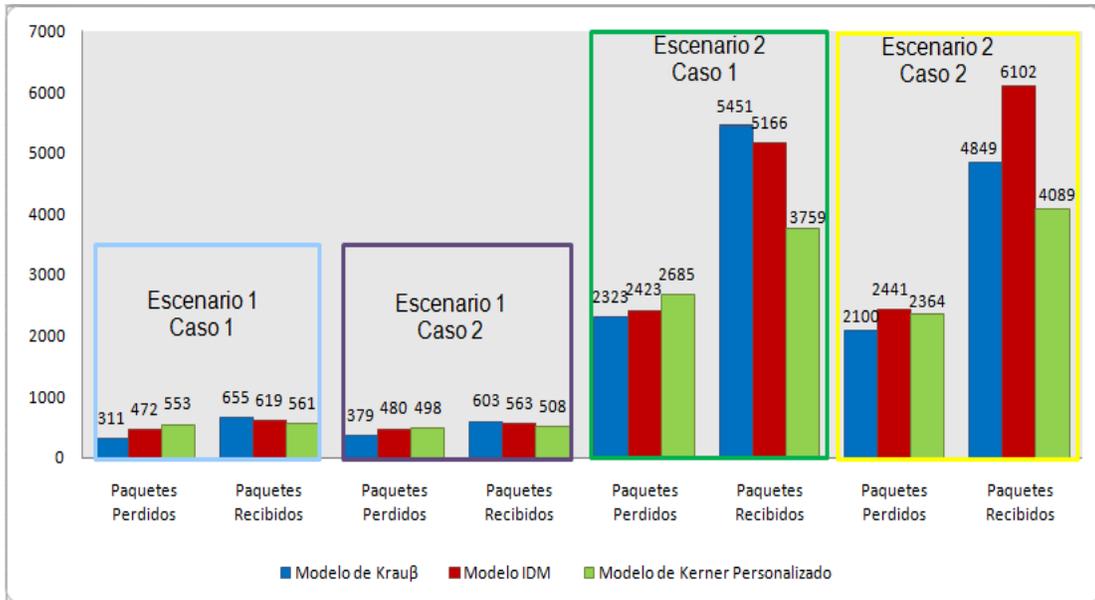


Figura 3.19 Paquetes recibidos y perdidos por modelo de movilidad en cada escenario y caso.

Los datos de PER para los escenarios y casos teniendo en cuenta todos los nodos que circulan por el área seleccionada para simulación se muestran en la Tabla 3.15.

ESCENARIO Y CASO	MODELOS DE MOVILIDAD	PER	
ESCENARIO 1 CASO 1	KRAUß	0.322	✓
	IDM	0.433	
	KERNER PERSONALIZADO	0.496	
ESCENARIO 1 CASO 2	KRAUß	0.386	✓
	IDM	0.460	
	KERNER PERSONALIZADO	0.495	
ESCENARIO 2 CASO 1	KRAUß	0.299	✓
	IDM	0.319	
	KERNER PERSONALIZADO	0.417	
ESCENARIO 2 CASO 2	KRAUß	0.302	
	IDM	0.285	✓
	KERNER PERSONALIZADO	0.366	

Tabla 3.15 Valores de PER para los escenarios y casos simulados. Por los Autores.

Los datos presentados en la Figura 3.19 y en la Tabla 3.15 evidencian que el número de paquetes perdidos y recibidos aumentan considerablemente cuando el número de usuarios en la red VANET aumenta. También se observa que el modelo de Krauß es el que presenta mejor desempeño en tres de los cuatro casos de estudio y el modelo IDM presenta mejores resultados para el caso restante, cumpliéndose así el análisis realizado con nodos específicos.

Puede verse que el modelo de Kerner Personalizado sigue cumpliendo la característica de mayor inmunidad ante el aumento de la velocidad de los nodos; esto también se ve en el número de paquetes perdidos, ya que disminuyen cuando la velocidad de los nodos es alta (aunque el modelo de Kerner sigue siendo el de peores resultados generales). Para los modelos de Krauß e IDM se observa una tendencia contraria al aumentar el número de paquetes perdidos cuando la velocidad de los nodos aumenta (ver Figura 3.19).

Los nodos que siguen el modelo de Krauß presentan una disminución en el valor de PER cuando la velocidad aumenta (tanto con usuarios bajos como con usuarios altos), pero diferenciándose en que para un número de usuarios alto el valor de PER es sólo un poco mayor. Para el modelo IDM se observa que los nodos que siguen este modelo presentan un mejor desempeño cuando el número de usuarios es alto.

Por lo anterior puede inferirse que el impacto del modelo de movilidad en una comunicación de datos de una red VANET depende de las características propias que imponga el modelo utilizado (agresividad al conducir, espacio entre vehículos, tiempo de reacción y grado de atención de conductores, entre otros) y también es influyente el número de usuarios presentes en la red.

3.3.4.2. Impacto de la velocidad

Con las figuras de velocidad especificadas anteriormente puede darse paso al análisis del impacto de éste parámetro en una comunicación de datos de una red vehicular. Para esto se estudió el tiempo exacto en el cual los nodos procesan paquetes y qué velocidad llevaban en dicho instante. Los nodos en estudio son los mismos de la sección 3.3.4.1 y se eligió el modelo de movilidad con mejores resultados.

a) Escenario 1, Caso 1, Modelo de Krauß

De la Figura 3.7 se obtiene la velocidad de los nodos para el escenario 1, caso 1 y modelo de Krauß. Mediante la interfaz "Tkenv" de OMNeT++ (Ver Anexo C, sección C.1.2) se obtiene la cronología de eventos que suceden durante el tiempo de simulación. En dichos eventos se encuentra el tiempo exacto donde los nodos reciben y pierden paquetes. La Tabla 3.16 resume lo dicho anteriormente para el modelo de Krauß.

NODO	PAQUETES RECIBIDOS	PAQUETES PERDIDOS	INSTANTE DE TIEMPO ANALIZADO (s)	VELOCIDAD INSTANTÁNEA (m/s)
3	9	12	21.2	8.5
	10	2	62.8	8.5
6	10	12	21.2	8.5
	10	3	62.8	0.0
11	9	6	21.2	6.8
	10	3	62.8	8.5
	1	0	107.7	0.0
	1	0	135.5	8.5
17	8	14	21.2	3.6
	10	3	62.8	0.0
	1	0	107.7	0.0
	1	0	135.5	8.5
26	10	2	62.8	8.5

Tabla 3.16 Paquetes recibidos y perdidos por instante, escenario 1 caso 1. Por los Autores.

De los datos presentados en la Tabla 3.16 puede comprobarse que, para el instante de 21.2 segundos es cuando se presentan mayores pérdidas de paquetes en cuatro de los cinco nodos en estudio (el nodo 26 no se ha hecho presente en la simulación), esto debido a que los nodos presentan una alta velocidad y se encuentran separados una distancia considerable, por lo que los paquetes transmitidos realizan mayores saltos entre vehículos. Además es necesario destacar que en la primera transmisión de datos los nodos envían un mayor número de paquetes en relación a los demás instantes de tiempo analizados, dado que están enviando paquetes de reconocimiento de los vehículos presentes en la VANET en dicho instante. No obstante, en el instante de 62.8 segundos se presentan menores pérdidas dada la cercanía de los nodos entre sí, lo que implica saltos de menor distancia entre vehículos por parte de los paquetes de datos. Por otra parte, cuando la velocidad instantánea es la máxima permitida por el escenario y el caso, se presentan mayores pérdidas, como se observa para los nodos 3, 6 y 26.

Dos casos especiales de los datos de la Tabla 3.16 son los nodos 6 y 17 en el instante de tiempo de 62.8 segundos, debido a que presentan velocidad cero y, aún así presentan pérdidas de paquetes. Esto se debe primordialmente a que los nodos se encuentran en la glorieta (área de convergencia para los nodos) y esto hace que el tiempo de ocupación del canal aumente considerablemente (ver Figura 3.8).

b) Escenario 1, Caso 2, Modelo de Krauß

Para el escenario 1, caso 2 el modelo de Krauß fue el que presentó mejores resultados, por lo que se presentan en la Tabla 3.17 los instantes donde se procesan paquetes, el número de paquetes recibidos y perdidos y la velocidad instantánea por nodo.

NODO	PAQUETES RECIBIDOS	PAQUETES PERDIDOS	INSTANTE DE TIEMPO ANALIZADO (s)	VELOCIDAD INSTANTÁNEA (m/s)
3	9	16	26.0	2.5
	8	0	51.5	10.5
6	10	16	26.0	2.5
	8	0	51.5	0.0
14	10	12	26.0	10.0
	8	0	51.5	7.5
	2	0	116.3	5.7
	1	0	135.5	0.0
17	4	0	232.4	11.3
	10	16	26.0	2.5
	8	0	51.5	0.9
	2	0	116.3	0.0
26	1	0	135.5	12.0
	8	16	26.0	2.5
	8	0	51.5	4.2

Tabla 3.17 Paquetes recibidos y perdidos por instante, escenario 1 caso 2. Por los Autores.

Por los datos presentados en la Tabla 3.17 puede concluirse que, 26 segundos después de iniciarse la simulación se presenta el peor desempeño de los nodos en estudio. Esto se debe principalmente a que cuatro de los cinco nodos se encuentran cerca de la glorieta y se presenta elevada ocupación del canal, además del mayor número de paquetes enviados por los nodos para procesar el reconocimiento de estos en la red VANET. Aunque cuatro de los cinco nodos en estudio presentan una velocidad baja en el instante de 26 segundos, la ubicación de los nodos y el mayor tiempo de ocupación del canal afectan negativamente en el desempeño de los paquetes procesados, por lo que puede decirse que, como los nodos se encuentran en la glorieta, lo que más afecta para este escenario y caso es el tiempo de ocupación del canal.

Una característica en particular de este caso es que sólo se presentan pérdidas en el primer instante de transmisión y recepción de paquetes. Esto se debe principalmente a que los nodos 3, 6 y 26 abandonan el área seleccionada para simulación más rápido en relación al escenario 1, caso 1; mientras que los nodos 14 y 17 permanecen en dicha área más tiempo, pero circulan a bajas velocidades en tres de cuatro instantes de análisis, influyendo así en que no haya pérdidas de paquetes.

Por otra parte, el nodo 14 presenta la mayor velocidad en el instante de 26 segundos, dado que circula por la avenida principal y se encuentra lejos de la glorieta. Esto incide directamente en los paquetes perdidos de dicho nodo.

c) Escenario 2, Caso 1, Modelo de Krauß

Para el escenario 2, caso 1, se tiene un mayor número de usuarios a una velocidad máxima de 8.5 m/s. La Tabla 3.18 muestra los datos de paquetes recibidos, perdidos, instantes donde se pierden y velocidad instantánea de los nodos.

NODO	PAQUETES RECIBIDOS	PAQUETES PERDIDOS	INSTANTE DE TIEMPO ANALIZADO (s)	VELOCIDAD INSTANTÁNEA (m/s)
3	8	21	26.9	0.0
	14	7	60.9	0.0
	9	2	107.6	0.0
	6	2	145.9	8.5
	7	0	172.9	8.5
15	9	15	26.9	8.5
	10	11	60.9	8.5
	9	2	107.6	0.0
	6	2	145.9	0.0
	8	1	172.9	0.0
	9	6	226.4	7.2
	6	0	244.6	8.5
17	7	22	26.9	7.5
	14	7	60.9	5.0
	8	0	107.6	8.5
30	13	7	60.9	8.5
	9	0	107.6	8.5
41	12	8	60.9	4.3
	9	2	107.6	0.3

Tabla 3.18 Paquetes recibidos y perdidos por instante, escenario 2 caso 1. Por los Autores.

De los resultados en la Tabla 3.18 se observa que, para el instante de 26.9 segundos el nodo 15 y el nodo 17 presentan las mayores pérdidas debido a la velocidad máxima que llevan; mientras que el nodo 3 se encuentra en la glorieta, lugar donde se presenta un mayor tiempo de ocupación del canal, por esto se presentan las pérdidas para el nodo 3 en el instante de 26.9 segundos.

Para 60.9 segundos se tiene que el nodo 3 presenta velocidad cero, pero menos paquetes perdidos en relación al instante de 26.9 segundos. Esto se debe a que aún se encuentra en la glorieta pero los saltos que dan los paquetes entre vehículo y vehículo son más pequeños (debido al mayor número de nodos presentes en dicha área), facilitando así la recepción de los mismos. Por otro lado los nodos restantes presentan velocidades elevadas, lo que influye en las pérdidas de los paquetes; además de que el nodo 17 y el nodo 30 se acercan a la glorieta donde se presentan pérdidas por uso elevado del canal.

Para los tiempos subsiguientes se tiene que los nodos pierden menos paquetes en relación a los primeros tiempos, por lo que se sigue cumpliendo la característica de que al iniciarse el proceso de identificación en la red, éstos presentan menos pérdidas que cuando apenas se están reconociendo.

En adición a esto, para el instante de 107.6 segundos los nodos en estudio se encuentran muy cerca entre sí, lo que facilita la transmisión de paquetes.

Comparando los datos de los literales **a**, **b** y **c**, puede verse un aumento tanto en los paquetes recibidos, los paquetes perdidos y los instantes donde se presentan dichos eventos. Esto se debe principalmente al aumento en el número de nodos presentes en la simulación. También, para los instantes de tiempo mayores (150 segundos o más) los nodos presentan más paquetes recibidos que perdidos sin importar la velocidad que lleven, dado que los nodos ya están saliendo del área seleccionada para simulación y han superado la glorieta, por lo que aumenta el número de paquetes recibidos y disminuye el número de paquetes perdidos.

d) Escenario 2, Caso 2, Modelo IDM

Para el último escenario y el último caso el modelo con mejor desempeño fue el IDM. En la Tabla 3.19 se muestra el resumen de paquetes recibidos y perdidos, el tiempo exacto donde se procesaron y la velocidad instantánea.

NODO	PAQUETES RECIBIDOS	PAQUETES PERDIDOS	INSTANTE DE TIEMPO ANALIZADO (s)	VELOCIDAD INSTANTÁNEA (m/s)
3	8	23	19.4	6.7
	12	6	47.6	0.0
	5	0	75.2	1.0
	5	2	106.5	0.0
	7	1	138.9	0.0
	7	0	168.6	17
14	6	25	19.4	13.9
	12	6	47.6	0.0
	5	0	75.2	0.0
	6	0	106.5	16.1
16	8	23	19.4	6.7
	13	5	47.6	0.0
	5	0	75.2	1.1
29	7	11	19.4	13.0
	12	6	47.6	14.2
	5	0	75.2	0.0
	5	2	106.5	0.0
	7	1	138.9	0.0
	7	0	168.6	0.0
	2	0	193.3	0.0
	5	10	214.5	2.2
36	6	2	244.5	14.5
	11	6	47.6	0.0
	5	0	75.2	0.0
	5	2	106.5	13.5

Tabla 3.19 Paquetes recibidos y perdidos por instante, escenario 2 caso 2. Por los Autores.

Para este último caso se tienen pérdidas en cuatro nodos en 19.4 segundos, los cuales transitan a una velocidad alta en dicho instante de tiempo, lo que incide en la cantidad de paquetes perdidos, además el número de paquetes perdidos es mayor en comparación a los datos de los anteriores casos dado que en este, los nodos circulan a una velocidad máxima más alta y el número de usuarios es alto. Por otra parte, para el instante de 47.6 segundos cuatro de los cinco nodos en estudio presentan velocidad cero y paquetes perdidos (aunque en menor cantidad que en el primer instante de tiempo), esto se debe al elevado tiempo de ocupación del canal por parte de los nodos presentes en la red VANET. El nodo 29 en éste instante de tiempo presenta una velocidad alta, lo que incide en el número de paquetes perdidos que presenta.

Posteriormente en el instante de 75.2 segundos se tiene que ningún nodo presenta pérdidas de paquetes, esto se debe principalmente al bajo número de paquetes recibidos por nodo (5) y a la velocidad casi nula de éstos. Por ende, mientras los nodos circulen con bajas velocidades o permanezcan con velocidad nula presentan menores pérdidas de paquetes.

Se evidencia que los nodos continúan con la tendencia a presentar elevados pérdidas de paquetes en los primeros instantes de simulación, mientras que en los instantes subsiguientes no se presentan tantas pérdidas llegando a ser casi nulas, por lo que, para todos los escenarios y casos se presenta la tendencia a perder un mayor número de paquetes al inicio de la simulación. El nodo 29 en el instante de 214.5 segundos no cumple con esta tendencia principalmente porque en dicho instante nuevos nodos hacen su entrada al área seleccionada para simulación, por lo que al enviar un mayor número de paquetes de reconocimiento para estos nodos se incrementan los paquetes perdidos.

En resumen, la velocidad de los nodos, el tiempo de ocupación del canal y el número de nodos presentes afectan el desempeño de una comunicación de datos en una VANET.

De los resultados descritos en las secciones 3.4.3.1 y 3.4.3.2 puede concluirse lo siguiente:

- El modelo de movilidad de Krauß es el que presentó mejores resultados en cuanto a PER para el escenario 1 caso 1, escenario 1 caso 2 y escenario 2 caso 1.
- Para un número de usuarios bajo con velocidad alta (escenario 1 caso 2) se presentó un aumento en el valor de PER para los modelos de Krauß e IDM en relación al escenario con número de usuarios bajo y velocidad baja.
- El modelo de Kerner Personalizado es el que presenta menor variación en el valor de PER cuando aumenta la velocidad de los nodos.
- El aumento en el número de usuarios cuando éstos circulan con velocidades bajas hace que el valor de PER aumente para los tres modelos de movilidad en estudio.

- Para el escenario 2 caso 2 (número de usuarios alto con velocidad alta), el modelo IDM fue el que presentó los mejores resultados, inclusive presentando mejor desempeño que el modelo de Krauß. Por lo que se evidencia la disminución en el valor de PER debido a los diversos tipos de comportamiento que maneja el modelo IDM.
- Al aumentar la velocidad de los nodos, el valor de PER para los modelos de Kerner Personalizado e IDM es menor en comparación a los nodos gobernados por una baja velocidad. Esto se da principalmente por la mayor inmunidad al aumento de la velocidad por parte del modelo de Kerner.
- La latencia máxima alcanzada en cada uno de los escenarios y casos simulados fue de 10 ms, mucho menor a la máxima permitida por cada aplicación, esto se da por la eficiencia en el protocolo de enrutamiento utilizado (WiseRoute) y por la naturaleza *broadcast* de los mensajes enviados por parte de los nodos.

Por último se presenta un resumen con las variables que afectan las comunicaciones en las redes VANET dados los resultados obtenidos en las secciones anteriores. La Tabla 3.20 muestra dichas variables.

VARIABLES QUE AFECTAN LAS COMUNICACIONES EN REDES VANET
VELOCIDAD DE LOS NODOS
MODELO DE MOVILIDAD Y SUS PARÁMETROS (TIPO Y AGRESIVIDAD DEL CONDUCTOR, ESPACIO DEJADO ENTRE VEHÍCULOS, VELOCIDAD, ACELERACIÓN, ENTRE OTROS).
TIEMPO DE OCUPACIÓN DEL CANAL
TRAYECTORIA DE LOS VEHÍCULOS
NÚMERO DE USUARIOS
DISTANCIA ENTRE NODOS
TIPO DE VEHÍCULO

Tabla 3.20 Variables que afectan las comunicaciones en redes VANET. Por los autores.

La velocidad de los nodos afecta principalmente a las comunicaciones en redes VANET puesto que, se pudo corroborar que al aumentar la velocidad con la que circulan, se tiende a perder un mayor número de paquetes. Por otra parte, el modelo de movilidad también es un aspecto que afecta las comunicaciones en este tipo de redes; puesto que al variar de modelo de movilidad el valor de PER se vio afectado por este cambio.

El tiempo de ocupación del canal va directamente ligado con la trayectoria de los vehículos y afectan principalmente las comunicaciones en redes VANET debido a que, si los vehículos circulan por sitios con un elevado número de intersecciones o cruces, el tiempo de ocupación del canal será mayor en relación a vehículos que circulen por autopistas. Por la misma razón, el número de usuarios presentes en la red afecta de alguna manera las comunicaciones en redes vehiculares.

Este capítulo presentó los resultados arrojados por la simulación en los 2 escenarios y casos que componen el plan de pruebas, con los cuales se realizó el análisis de los principales parámetros de los modelos de movilidad y la velocidad y su efecto en el desempeño en una comunicación de datos de la red VANET.

4. CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1. CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones, las recomendaciones y los trabajos futuros resultado de la realización de este trabajo de grado. Las conclusiones se basan en los objetivos propuestos y en su desarrollo, tal como se ha registrado en este documento. Las recomendaciones se dan acerca de la metodología de trabajo y los trabajos futuros con respecto a las herramientas de simulación, técnicas de acceso y escenarios de simulación.

4.1.1. Respecto a la velocidad y al modelo de movilidad de los nodos

- ✓ Las redes VANET presentan cambios frecuentes en su topología debido a la naturaleza del movimiento de los nodos. Este dinamismo en la topología se hace más evidente en áreas con un alto número de cruces e intersecciones en donde los nodos tienen la libertad de elegir su trayectoria.
- ✓ La velocidad máxima que pueda alcanzar un vehículo está limitada al área por donde circule y todos los elementos que obliguen a frenar (como cruces, semáforos, glorietas, entre otros).
- ✓ En el modelo de movilidad IDM los nodos presentan velocidades instantáneas más aleatorias y caóticas en relación a los otros nodos estudiados. Esto debido a los cuatro tipos de comportamientos presentes en el modelo de movilidad.
- ✓ El mapa conceptual para la generación de modelos de movilidad brinda toda la información respecto a las posibles variables que puedan llegar a afectar los modelos. Si bien es cierto que se realizó una adaptación al entorno colombiano con sus particularidades, el mapa general es una buena aproximación.

4.1.2. Respecto al desarrollo de la simulación

- ✓ La definición de los archivos de flujo, rutas, mapas y configuración en la herramienta SUMO debe ajustarse mayoritariamente a través de líneas de código, ya que esta no cuenta con una interfaz gráfica para ello y MOVE crea dichos archivos de manera general.
- ✓ Las herramientas de simulación para redes VANET pueden instalarse en los principales sistemas operativos actuales. Lo que incide positivamente en la cantidad de estudios acerca de redes vehiculares *ad hoc*.
- ✓ La integración de los simuladores SUMO y OMNeT++ permitió obtener resultados más acordes a la realidad debido al funcionamiento paralelo de dichas herramientas de simulación.

- ✓ Para un mayor realismo en las simulaciones, es preciso modificar mediante líneas de código el tipo de vehículo que ejecuta SUMO por defecto (triángulos amarillos) para adaptar dichos vehículos a las necesidades particulares.

4.1.3. Respecto a los resultados de la simulación

- ✓ Las variables que afectan el desempeño de una comunicación de datos en una red VANET son la velocidad de los nodos, el modelo de movilidad utilizado por cada nodo, el tiempo de ocupación del canal, las trayectorias de los vehículos, el número de usuarios presentes en la red, la separación entre nodos y el tipo de vehículo.
- ✓ A nivel general, un mayor número de usuarios en la red vehicular influye directamente en el aumento de paquetes perdidos y recibidos por parte de los nodos en la red.
- ✓ Los distintos tipos de vehículos simulados incidieron en el desempeño de la comunicación en la red vehicular por sus tamaños al provocar congestión en la glorieta dado el tamaño de los buses y camiones; los cuales impidieron el paso de otros vehículos mientras esperaban el cambio de semáforo.
- ✓ El aumento significativo de la velocidad máxima de los nodos afecta negativamente el desempeño de una comunicación de datos en una VANET cuando en la red se presentan pocos usuarios, lo que incide en la cantidad de paquetes perdidos por nodo.
- ✓ El modelo de movilidad de Krauß presentó mejores resultados en tres de los escenarios analizados a causa de la dependencia en el movimiento de los nodos por parte de los vehículos predecesores; ya que el escenario de simulación impone paradas de semáforos, buses y área de glorieta. Además este modelo presenta como característica exclusiva el grado de atención del conductor sigma (σ), lo que disminuye los valores de PER para el modelo.
- ✓ El modelo de movilidad de Kerner Personalizado presentó mayor inmunidad a los cambios de velocidad, tanto para un elevado número de usuarios como para un bajo número. El valor de PER permaneció casi constante cuando se varió dicho parámetro y además, el número de paquetes perdidos disminuyó cuando la velocidad de los nodos fue alta.
- ✓ El instante donde se presentan mayores pérdidas sin importar el modelo de movilidad, la velocidad de los nodos o el número de usuarios siempre fue la primera transmisión de datos. Esto se debe a que se están reconociendo los nodos presentes en la red VANET, lo que implica un mayor número de paquetes enviados y recibidos por nodo. Además los nodos se encuentran bastante lejos entre sí y el resultado de esto es un aumento en los paquetes perdidos.

- ✓ El modelo de movilidad de Kerner personalizado sirvió como referencia para comparar el desempeño entre dos modelos ya establecidos y uno caracterizado por el entorno de simulación. Aunque no presentó el mejor desempeño, presentó menos paquetes perdidos cuando los nodos circularon a velocidades altas que cuando circularon a velocidades bajas.
- ✓ Dadas las características del área de simulación, los nodos con rutas cortas presentaron menos pérdidas que los nodos que recorrieron rutas largas, ya que los primeros recorrieron menores distancias y salieron de la simulación más rápido que los segundos, disminuyendo así tanto los paquetes recibidos como los perdidos.
- ✓ En el área seleccionada para simulación y específicamente en la glorieta se presentó un mayor tiempo de ocupación del canal radio, puesto que se formaba un congestionamiento por los semáforos, afectando así el desempeño de la comunicación de datos en la VANET.
- ✓ Los nodos que siguieron el modelo de Kerner personalizado alcanzaron la velocidad máxima programada en un tiempo menor que los nodos bajo los dos modelos restantes. Esto incidió negativamente en los resultados presentados en relación a PER por parte del modelo de Kerner.

4.2. RECOMENDACIONES

El desarrollo de este trabajo de grado presentó retos adicionales en términos de manejo de información, de líneas de código y otros apartados. Es por esto que se hace necesario nombrar recomendaciones para futuros trabajos en el área de las VANET.

- ✓ Se deben conocer todas las variables que genera MOVE y JOSM al compilar rutas, flujos y demás, puesto que si se desean realizar modificaciones (como adición de semáforos, paradas de buses, etc.) éstas deben escribirse manualmente en distintas partes del código.
- ✓ En el caso del modelo IDM, es necesario tener en cuenta las prioridades que puedan tener las vías primarias sobre las secundarias en el área seleccionada para simulación, dado que este modelo puede presentar problemas si los nodos no reconocen bien cuál es la vía con mayor prioridad.
- ✓ Teniendo en cuenta que OMNeT++ arroja información acerca de todo lo que ocurre en la simulación, es conveniente tomar dicha cronología de eventos y copiarla a un procesador de textos para recopilar de manera segura la información, ya que en el simulador los eventos más antiguos van siendo reemplazados por los eventos más nuevos.
- ✓ Es recomendable determinar proporciones para los distintos tipos de conductores que se manejan en el modelo IDM y adaptarlas a cada caso en particular. Esto es claro en la descripción de escenarios cuando se adaptan las velocidades baja y alta a cada tipo de conductor descrito en el modelo.

- ✓ En vista de los cambios de nomenclatura que realiza OMNeT++ a los nodos, es preferible nombrar los nodos en SUMO de manera que pueda especificarse su ruta u otra característica particular de cada nodo. Siempre tener en cuenta el nombre dado a los nodos en SUMO y realizar la equivalencia entre éste nombre y el nombre dado por OMNeT++.
- ✓ Para hacer más realista la simulación es deseable observar el área de simulación en la vida real y analizar el número de vehículos que circulan por las distintas vías. Caracterizar y priorizar las vías primarias y secundarias y llevar dichos datos al simulador; además de describir realmente los tiempos de los semáforos y los tipos de vehículos que circulan por cada vía.
- ✓ Para mejorar la presentación visual del escenario de simulación, se recomienda definir distintos colores para cada tipo de vehículo y evitar la monotonía en el área seleccionada para simulación.
- ✓ Como la comunicación entre SUMO y OMNeT++ se realiza vía TCP, se requieren los permisos necesarios en el *firewall* del sistema operativo para que no haya problemas de conectividad.
- ✓ Tal vez la recomendación más importante hace referencia a comprobar previamente la correcta compilación de la simulación del tráfico vehicular en SUMO antes de ejecutar OMNeT++, dado que el simulador de red puede tardar hasta 7 horas en terminar dicha simulación, y si algún problema ocurre con los nodos será tiempo perdido.

4.3. TRABAJOS FUTUROS

Por último se proponen varios trabajos futuros que abordan temáticas y variables que pueden desarrollarse a partir del presente trabajo, entre estos están los siguientes:

- ✓ **Simulación de aplicaciones de *infotainment* y de eficiencia de tráfico en redes VANET:** como este trabajo de grado se centró principalmente en aplicaciones de seguridad al analizar la ocurrencia de un accidente de tránsito y la optimización del trayecto recorrido, se propone un futuro trabajo en el cual se profundicen los resultados aquí descritos mediante la implementen aplicaciones de *infotainment* en el cual los nodos compartan información y accedan a Internet, entre otras.
- ✓ **Análisis de modelos de movilidad macroscópicos y pérdidas por desvanecimiento, lluvia y demás en redes VANET:** al centrarse en modelos de movilidad microscópicos, este trabajo de grado no tomó en cuenta características del entorno de simulación y su posible impacto en las comunicaciones entre vehículos, por lo que se propone el desarrollo de un trabajo de grado que analice características macroscópicas del entorno (como edificios, árboles, estatuas, entre otras) y tener en cuenta pérdidas adicionales a las pérdidas de espacio libre.

- ✓ **Estudios comparativos entre escenarios de comunicación en redes vehiculares:** el trabajo de grado descrito en este documento se centró exclusivamente en comunicaciones entre vehículos o V2V, es por esto que se proponen trabajos futuros para analizar el desempeño de los diversos escenarios de comunicación en las redes VANET como V2I, V2P, V2G, etc. Además de tener presente siempre el realismo en los mapas elegidos como el comportamiento de los vehículos.
- ✓ **Impacto de las motocicletas, bicicletas y vehículos típicos colombianos en una comunicación de datos de una VANET:** se propone analizar el impacto que puedan llegar a tener las motocicletas (y su particular y agresivo estilo de conducción), las bicicletas y otros vehículos típicos de Colombia (carretillas, carrosas, vehículos de tracción animal, entre otros) en una comunicación de datos de una VANET, debido a que en este trabajo de grado se mencionaron en el mapa conceptual para la generación de modelos de movilidad pero no se implementaron en simulación.

REFERENCIAS

- [1] S. Senouci, H. Moustafa y M. Jerbi, *Vehicular Networks: Techniques, Standards and Applications*, 1a ed. Boston, Massachusetts, USA: Auerbach Publications, 2009. Cap. 1.
- [2] A. Hassan, "VANET Simulation," Tesis de MsC. en Ingeniería Eléctrica, Escuela de Ciencias de Información, Computación e Ingeniería Eléctrica, Universidad de Halmstad, Halmstad: Suecia, 2009.
- [3] J. Haerri, "Performance Comparison of AODV and OLSR in VANETs Urban Environments under Realistic Mobility Patterns," Departamento de Comunicaciones Móviles B.P. 193 06904, Sophia Antipolis, Francia, 2006.
- [4] H. Wu, "Analysis and Design of Vehicular Networks," Tesis de PhD. en Ciencias de la Computación, Instituto de Tecnología de Georgia, USA, Diciembre 2005.
- [5] A. Mahajan et al., "Evaluation of Mobility Models for Vehicular Ad-hoc Network Simulations," Reporte Técnico N.051220, Universidad del Estado de Florida, USA, 2005.
- [6] K. Ahmed et al., "Models of Freeway Lane Changing and Gap Acceptance Behavior," en *Proc. of the 13th Internat. Sympo. on the Theory of Traffic Flow and Transportation*, Lyon, Francia, 1978.
- [7] A. Miller, "Nine estimators of gap acceptance parameters," en *Proc. of the 6rd Internat. Sympo. on the Theory of Traffic Flow and Transportation*, Nueva York, USA, 1971.
- [8] R. Herman y W. Rothery, "Car-following and steady state flow," en *Theory of Traffic Flow Sympo. Proc.*, 1973.
- [9] About RITA | Research and Innovative Technology Administration. [Online]. Disponible: http://www.rita.dot.gov/about_rita [Consultado: 09 Nov 2012].
- [10] J. Sussman, *Perspectives on Intelligent Transportation Systems*, 1a ed. Nueva York, USA: Springer Science + Business Media Publications, 2005.
- [11] M. Emmelmann, B. Bochow y C. Kellum, eds, *Vehicular Networking: Automotive Applications and Beyond*, 1a ed. Gran Bretaña: John Wiley & Sons Ltd, 2010.
- [12] S. Wang y C. Chou., "NCTUns Simulator for Wireless Vehicular Ad Hoc Network Research" en J. N. Turner y C. S. Boyer, editores, *Ad Hoc Networks: New Research*. Nova Science Publishers, 2009.
- [13] I. Leontiadis y C. Mascolo, "GeOpps: Geographical Opportunistic Routing for Vehicular Networks," en *IEEE Internat. Sympos. on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, Helsinki: Finlandia, ACM 2007: pp. 1-6.
- [14] J. Freudiger et al., "Mix-zones for location privacy in vehicular networks," en *Proceedings of the First International Workshop on Wireless Networking for Intelligent Transportation Systems (Win-ITS)*, Vancouver, Canadá, Agosto 2007.
- [15] H. Guo, *Automotive Informatics and Communicative Systems*, 1a ed. Hershey, Pennsylvania, USA, IGI Global Inc., 2009, cap. 14.
- [16] B. Parno y A. Perrig, "Challenges in Securing Vehicular Networks," en *Workshop on Hot Topics in Networks*, College Park, Maryland: USA, Noviembre 2005.

- [17] H. Wu et al., "MDDV: A Mobility-Centric Data Dissemination Algorithm for Vehicular Networks," en *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, Philadelphia, Pennsylvania, USA, Octubre 2004.
- [18] V. Sardeshmukh, "Vehicular Ad Hoc Networks," en *Class Conference in School of Information Technology*, Kharagpur: India, 2010.
- [19] M. Gerla, L. Kleinrock, Vehicular networks and the future of the mobile internet, *Comput. Netw.* (2011), doi:10.1016/j.comnet.2010.10.015.
- [20] R. Baldessari et al., "Flexible Connectivity Management in Vehicular Communication Networks," en *Proc. of International Workshop on Intelligent Transportation*, Hamburgo, Alemania, Marzo 2006.
- [21] T. Strang y M. Rockl, Vehicle Networks-V2X communication protocols, Deutsches Zentrum fur Luft-und Raumfahrt, Colonia, Alemania, 2008.
- [22] V. Bychkovsky et al., "A Measurement Study of Vehicular Internet Access Using In Situ Wi-Fi Networks," en *12th ACM MOBICOM Conf.*, Los Angeles, California, USA. Septiembre 2006.
- [23] D. Hadaller et al., "Vehicular Opportunistic Communication Under the Microscope," en *ACM MobiSys*, Puerto Rico, Junio 2007.
- [24] J. Eriksson, H. Balakrishnan, y S. Madden, "Cabernet: Vehicular content delivery using WiFi," en *ACM MobiCom*, San Francisco, California, USA, 2008.
- [25] N. Frangiadakis, D. Kuklov, y N. Roussopoulos, "Pegasus: 802.11 connectivity at high speed," en *IEEE Globecom Workshops*, Washington, USA, 2007.
- [26] H. Moustafa y Y. Zhang, *Vehicular Networks: Techniques, Standards and Applications*, 2a ed. Boston, Massachusetts: USA, Auerbach Publications, 2011.
- [27] K. Zhu et al., "Mobility and Handoff Management in Vehicular Networks: A Survey," en *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, 2009. DOI: 10.1002/wcm.844.
- [28] M. Raya et al., "Eviction of Misbehaving and Faulty Nodes in Vehicular Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 25, no. 8, pp. 1-12, Octubre 2007.
- [29] International Telecommunication Union, ITU-T, Recommendation ITU-T Y.2281: Framework of networked vehicle services and applications using NGN, Enero 2011.
- [30] Car 2 Car Communication Consortium, Organisation. [Online]. Disponible: <http://www.car-to-car.org/index.php?id=22> [Consultado: 20 Sep 2012].
- [31] A. Stampoulis y Z. Chai, A Survey of Security in Vehicular Networks, Proyecto CPSC 534, Universidad de Yale, New Haven, Connecticut, USA: 2007.
- [32] F. Martínez et al., "A survey and comparative study of simulators for vehicular ad hoc networks (VANETs)," en *Wirel. Commun. Mob. Comput.* Nueva York, USA: ACM, 2009.
- [33] G. Pallis et al., "On the Structure and Evolution of Vehicular Networks," en *IEEE Internat. Symp. on Modeling, Analysis & Simulation of Comp. and Telec. Systems*, Londres, Inglaterra, 2009, pp. 1-10.
- [34] A. Rowstron y G. Pau, Characteristics of a Vehicular Network, Reporte Técnico 09-0017, Universidad de California Los Angeles (UCLA), Departamento de Ciencias Computacionales, 2009.

- [35] A. Boukerche, PhD, ed, *Algorithms and Protocols for Wireless and Mobile Ad Hoc Networks*, 1a ed. Nueva Jersey, USA, John Wiley & Sons, 2009, cap. 15.
- [36] A. Pachón, C. Nieto y M. Velasco, "Modelos de comportamiento de las redes vehiculares en sus escenarios más representativos, utilizando simulación en la herramienta NCTUns," *Sistemas y Telemática: Revista de la Facultad de Ingeniería, Universidad ICESI*, vol. 8, no 15, Ene. 2010, pp. 13-25.
- [37] R. Baldessari et al., "A MANET-centric Solution for the Application of NEMO in VANET Using Geographic Routing," en *1st Workshop on Exp. Eval. and Deployment Experiences on Vehicular networks*, Innsbruck: Austria, ACM: 2008.
- [38] Y. Toor et al., "Vehicle Ad Hoc Networks: Applications and Related Technical Issues," *IEEE Communications Surveys*, vol. 10, no. 3, pp. 74-88, Octubre 2008.
- [39] Y. Ding, C. Wang y L. Xiao, "A Static-Node Assisted Adaptive Routing Protocol in Vehicular Networks," en *Proced. of the 4th ACM Internat. workshop on VANETs*, Nueva York, USA: ACM 2007, pp. 59-68.
- [40] Y. Qian y N. Moayeri, "Design Secure and Application-Oriented VANETs," en *Proceedings of IEEE VTC'2008-Spring*, Singapur, Mayo 11-14, 2008.
- [41] E. Schoch et al., "Communication Patterns in VANETs," en *IEEE Comm. Magazine*, vol. 46, no. 11, Noviembre 2008.
- [42] Y. Qian, K. Lu, y N. Moayeri, "A secure vanet MAC protocol for DSRC applications," en *GLOBECOM*, 2008, pp. 1945–1949.
- [43] D. Jiang y L. Delgrossi, "IEEE 802.11p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments," en *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) Spring 2008*, pp. 2036–2040, 2008.
- [44] K. Bilstrup, "A Survey Regarding Wireless Communication Standards Intended for a High-Speed Vehicle Environment," Escuela de Ciencias de Información, Computación e Ingeniería Eléctrica, Universidad de Halmstad, Suecia, Rep: IDE0712, 2007.
- [45] RITA-Intelligent Transportation Systems-DSRC: The Future of Saber Driving, Fact Sheet. [Online]. Disponible: http://www.its.dot.gov/factsheets/dsrc_factsheet.htm [Consultado: 27 Sep 2012].
- [46] G. Abdalla, M. Abu-Rgheff y S. Senouci, "Current Trends in Vehicular Ad Hoc Networks," en *IEEE Global Information Infrastructure Symposium*, Marruecos, Julio 2007.
- [47] Federal Communications Commission. FCC 99-305. FCC Report and Order, Octubre 1999.
- [48] *Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements-Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, IEEE Standard 802.11, Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments, Julio 2010.
- [49] M. Di Felice et al., "On the Impact of Multi-channel Technology on Safety-Message Delivery in IEEE 802.11p/1609.4 Vehicular Networks," en *21st Internat. Conference on Computer Communications and Networks*, Munich, Alemania, Agosto 2012, pp. 1-8.
- [50] M. Raya y J. P. Hubaux, "Securing vehicular ad hoc networks", *Journal of Computer Security*, Vol. 15, No. 1, pp. 39-68, 2007.

- [51] J. Jakubiak, "State of the Art and Research Challenges for VANETs," en *Consumer Communications and Networking Conference*, Danvers, Massachusetts, USA: ACM 2008, pp. 912-916.
- [52] A. Mahajan et al., "Urban Mobility Models for VANETs," en *Proc. of 2nd Workshop on Next Generation Wireless Networks*, Bangalore, India, Diciembre 2006.
- [53] L. Khan, N. Ayub y A. Saeed, "Anycast Based Routing in Vehicular Adhoc Networks (VANETS) using Vanetmobisim," *World Applied Sciences Journal* 7 (11), ISSN 1818-4952, IDOSI Publications, 2009, pp. 1341-1352.
- [54] J. Harri, et al., "Vehicular mobility simulation with vanet-mobisim," *Transactions of The Society for Modeling and Simulation*, Septiembre 2009.
- [55] N. Meghanathan y S. Gorla, "On the Probability of k-Connectivity in Wireless Ad hoc Networks under Different Mobility Models," *International journal on applications of graph theory in wireless ad hoc networks and sensor networks*, Vol.2, No 3, Septiembre 2010.
- [56] M. Fiore et al., "Vehicular Mobility Simulation for VANETs," en *40th Annual Simulation Symposium*, Norfolk, Virginia, USA, Marzo 2007.
- [57] K. Lan y C-M. Chou, "Realistic mobility models for Vehicular Ad hoc Network (VANET) simulations," en *8Th Internat. Conference on ITS Telecommunications*, Phuket, Tailandia, Octubre 2008.
- [58] H. Hartenstein y K. Laberteaux, ed., "VANET: Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies," 1a. ed. John Wiley & Sons Ltd., Torquay, Reino Unido, 2010.
- [59] A. Gainaru, C. Dobre y V. Cristea, "A Realistic Mobility Model Based on Social Networks for the Simulation of VANETs," en *69th Vehicular Technology Conference*, Barcelona, España, Abril 2009, pp. 1-5.
- [60] J. Cruz, "Estudio y simulación de una red AD-HOC vehicular VANET," Tesis de Pregrado, Escuela Politécnica del Ejército, Facultad de Ingeniería Electrónica, Quito, Ecuador, 2009.
- [61] T. Camp, J. Boleng, y V. Davies, "A Survey Of Mobility Models For Ad Hoc Network Research," en *Wireless Communications & Mobile Computing - Special Issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications*, 2002, pp. 483–502.
- [62] N. Aschenbruck, E. Gerhards-Padilla y P. Martini, "A survey on mobility models for performance analysis in tactical mobile networks," *Journal of Telecommunications and Information Technology*, vol. 2, pp. 54–61, 2008.
- [63] F.J. Martínez et al., "CityMob: A Mobility Model Pattern Generator for VANETs," en *IEEE Internat. Conference on Comm. Workshops*, Beijing, China, May 2008, pp. 370-374.
- [64] A. Pardo, "C4R: Generación de Modelos de Movilidad para Redes de Vehículos a partir de Mapas Reales," Tesis de Pregrado, Escuela Universitaria Politécnica de Teruel, Zaragoza, España, Marzo 2011.
- [65] J. Harry, F. Filali y C. Bonnet, "Mobility models for vehicular ad hoc networks: a survey and taxonomy," en *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol 11, Octubre 2009.

- [66] R. Leiva, "Simulación de VANETS (Vehicular Ad-Hoc Networks)," Tesis de Pregrado, Escola Politecnica Superior de Castelldefels, Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona, España, Noviembre 2007.
- [67] S. Krauß, "Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics," Hauptabteilung Mobilität und Systemtechnik des DLR, Colonia, Alemania, 1998.
- [68] B. Kerner, "Experimental Features of Self-Organization in Traffic Flow," Transportation Research Record, Physical Review Letters, 1998.
- [69] P. Wagner, "How human drivers control their vehicle," *The European Physical Journal*, 2006, pp. 427-431.
- [70] A. Kesting, M. Treiber, y D. Helbing, "Agents for Traffic Simulation", en: Multi-Agent Systems: Simulation and Applications. Taylor and Francis, 2008.
- [71] H. Meyer et al., "VANET Mobility Modeling Challenged by Feedback Loops," en *The 10th IFIP Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop*, Sicilia, Italia, 2011, pp. 95-102.
- [72] W. Wenjing, X. Fei y M. Chatterjee, "An Integrated Study on Mobility Models and Scalable Routing Protocols in VANETs," en *2007 Mobile Networking for Vehicular Environments*, Alaska, USA, 2007, pp. 97-102.
- [73] D. Djenouri, W. Soualhi y E. Nekka, "VANET's Mobility Models and Overtaking: An Overview," en *3rd Internat. Conf. on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications*, Damasco, Siria, Abril 2008, pp. 1-6.
- [74] M. Musolesi y C. Mascolo, "Mobility Models for Systems Evaluation," *Middleware for Network Eccentric and Mobile Applications*, Springer, New Mexico, USA, Feb.2009, pp. 43-62
- [75] J. Harry, F. Filali y C. Bonnet, "Mobility models for vehicular ad hoc networks: a survey and taxonomy," en *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol 11, Octubre 2009.
- [76] P. Santi, "Mobility Models for Next Generation Wireless Networks," 1a. ed. Jonh Wiley & Sons Ltd., Chennai, India, 2012.
- [77] K. Lan and C-M. Chou, "Realistic mobility models for Vehicular Ad hoc Network (VANET) simulations," en *8ª Internat. Conference on ITS Telecommunications*, Phuket, Tailandia, Octubre 2008.
- [78] R. Murcia, "Evaluación de herramientas de simulación de Redes Vehiculares," Trabajo Fin de Máster, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España, Octubre 2010.
- [79] H. Samaniego, "Simulación de Redes Vehiculares/VANET en Entornos Reales," Trabajo Fin de Máster, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación, Universidad de Málaga, Málaga, España, Julio 2012.
- [80] Michael Behrisch, Laura Bieker, Jakob Erdmann y Daniel Krajzewicz. *SUMO - Simulation of Urban MObility: An Overview* In: SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation, 2011
- [81] Rapid Generation of Realistic Simulation for VANET, Chien-Ming Chou. [Online]. Disponible: http://lens.csie.ncku.edu.tw/Joomla_version/index.php/research-projects/past/18-rapid-vanet. [Consultado: 4 Mar 2013].

- [82] Grupo de Redes de Computadores, Universidad Politécnica de Valencia, España. [Online]. Disponible: <http://www.grc.upv.es/Software/citymob.html>. [Consultado: 4 Mar 2013].
- [83] User Information – Nsnam. [Online]. Disponible: http://nsnam.isi.edu/nsnam/index.php/User_Information. [Consultado: 5 Mar 2013].
- [84] What is ns-3 α ns-3. [Online]. Disponible: <http://www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3/>. [Consultado: 5 Mar 2013].
- [85] OMNeT++ Network Simulation Framework. [Online]. Disponible: <http://www.omnetpp.org/>. [Consultado: 5 Mar 2013].
- [86] MobiREAL: realistic network simulator for MANET. [Online]. Disponible: <http://www.mobireal.net/>. [Consultado: 6 Mar 2013].
- [87] Veins – Vehicles in Network Simulation, C. Sommer. [Online]. Disponible: <http://veins.car2x.org/>. [Consultado: 5 Mar 2013].
- [88] R. Mangharam et al., "GrooveNet: A Hybrid Simulator for Vehicle-to-Vehicle Networks," en *The 3rd Annual Internat. Conf. on Mobile and Ubiquitous Systems*, California: USA, Julio 2006.
- [89] EstiNet Network Simulator and Emulator (NCTUns). [Online]. Disponible: <http://nsl.csie.nctu.edu.tw/nctuns.html>. [Consultado: 6 Mar 2013].
- [90] O. M. Ülgen ET AL., "Simulation Methodology -- A Practitioner's Perspective," University of Michigan-Dearborn, MI, 2006.
- [91] V. Wojcik, "Steps in Simulation and Model Building," en *Simulation Methodology – Discrete Event Simulation*, ed Ontario, Canada, 2003.
- [92] Definition_of_Vehicles,_Vehicle_Types,_and_Routes – SUMO – Simulation of Urban Mobility. German Aerospace Center, Institute of Transportation Systems. [Online]. Disponible: http://sumo.sourceforge.net/doc/current/docs/userdoc/Definition_of_Vehicles,_Vehicle_Types,_and_Routes.html. [Consultado: 9 Mar 2013]
- [93] Miguel Hernán Muñoz Salamanca, Respuesta a Derecho de Petición, Secretaría de Tránsito Municipal, Popayán, Cauca, Abril de 2013.
- [94] A. Caicedo y J. Martínez, "Evaluación del Desempeño de Redes 802.11p/WAVE en la Transmisión de Datos, Voz y Video IP," Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, Diciembre 2011.
- [95] The CAMP Vehicle Safety Communications Consortium: BMW, DaimlerChrysler, Ford, GM, Nissan, Toyota & VW, "Vehicle Safety Communications Project Task 3 Final Report; Identify Intelligent Vehicle Safety Applications Enabled by DSRC," Technical Report No. DOT HS 809 859, Marzo 2005.