



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE QUITO**

**CARRERA DE COMPUTACIÓN**

**MAPEO SISTEMÁTICO SOBRE SOLUCIONES AL TRÁFICO VEHICULAR EN  
CIUDADES INTELIGENTES**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero en Ciencias de la Computación

AUTOR: FRANKS ANTHONY SAÑAY SANAICELA

TUTOR: JOSÉ LUIS AGUAYO MORALES

Quito – Ecuador

2023

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Franks Anthony Sañay Sanaicela con documento de identificación N.º 1752332617; manifiesto que:

Soy autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 28 de febrero de 2023

Atentamente,



Franks Anthony Sañay Sanaicela

1752332617

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Franks Anthony Sañay Sanaicela con documento de identificación N.º 1752332617, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Mapeo sistemático sobre soluciones al tráfico vehicular en ciudades inteligentes”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Ciencias de la Computación en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 28 de febrero de 2023

Atentamente,



Franks Anthony Sañay Sanaicela

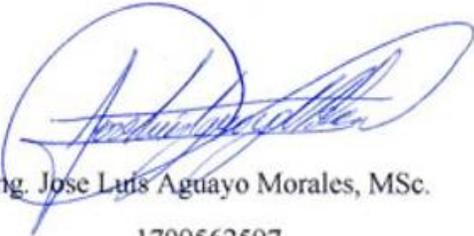
1752332617

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, José Luis Aguayo Morales con documento de identificación N.º 1709562597, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: MAPEO SISTEMÁTICO SOBRE SOLUCIONES AL TRÁFICO VEHICULAR EN CIUDADES INTELIGENTES, realizado por Franks Anthony Sañay Sanaicela con documento de identificación N.º 1752332617, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 28 de febrero de 2023

Atentamente,



Ing. José Luis Aguayo Morales, MSc.  
1709562597

# Mapeo sistemático sobre soluciones al tráfico vehicular en ciudades inteligentes

## Systematic mapping on solutions to vehicle traffic in smart cities

Franks Sañay<sup>1</sup>, José Aguayo<sup>2</sup>

**Resumen**—El tráfico vehicular es un problema que se presenta en muchas ciudades a nivel mundial, para encontrar soluciones a este problema, en las ciudades inteligentes se han propuesto algunas herramientas para gestionar el flujo de la congestión vehicular. En la presente investigación se ha realizado un estado del arte con mapeo sistemático, para recopilar y procesar los estudios más relevantes de revistas y conferencias de los repositorios con mejor información publicada entre los años 2018 a 2022. Mediante revisión sistemática de literatura se analizaron soluciones al tráfico vehicular, para clasificarlas en redes de comunicación y otras aplicaciones tecnológicas dentro de los sistemas de transporte inteligente. La taxonomía mostró las herramientas (sistemas, mecanismos, modelos y esquemas) junto con los algoritmos más utilizados, destacando las métricas de desempeño en sus resultados. La métrica más utilizada fue: *package delivery rate*, y según el promedio los datos cuantitativos fueron: sistemas = 80,2 %, mecanismos = 66,8 %, modelos = 87 % y esquemas = 95 %. Por lo tanto, los resultados revelan que los modelos tienen un mejor promedio en comparación con otras herramientas para gestionar el tráfico vehicular, excluyendo el promedio de los esquemas ya que solo hay un estudio que hace uso de esta métrica.

**Palabras Clave**—Vehicular, Tráfico, Solución, Mapeo Sistemático.

**Abstract**—Vehicular traffic is a problem that occurs in many cities worldwide, to find solutions to this problem, in smart cities, some tools have been proposed to manage the flow of vehicular congestion. In the present investigation, a state of the art has been done out with systematic mapping, to collect and process the most outstanding studies of journals and conferences from the repositories with the best information published between the years 2018 to 2022. Through systematic literature review, solutions to vehicular traffic were analyzed, to classify them in communication networks and other technological applications within intelligent transport systems. The taxonomy showed the tools (systems, mechanisms, models and schemes) together with the most used algorithms, highlighting performance metrics in its results. The most used metric was: *package delivery rate*, and according to the average the quantitative data were: systems = 80.2 %, mechanisms = 66.8 %, models = 87 % and schemes = 95 %. Therefore, the results reveal that the models have a better average compared to other tools to manage vehicular traffic, excluding the average of the schemes since there is only one study that makes use of this metric.

**Keywords**—Vehicular, Traffic, Solution, Systematic Mapping.

### I. INTRODUCCIÓN

Como afirma el autor Motta Ramirez [1], alrededor de todo el mundo existen ciudades que son pobres en tecnología y por esa razón la calidad de vida de estos ciudadanos no es buena. En general estas ciudades son tercermundistas y sus autoridades no tienen el conocimiento necesario para implementar las nuevas funcionalidades de las ciudades inteligentes para poder mitigar y mejorar la gestión del tráfico vehicular. En la actualidad la residencia en ciudades de la población mundial es del 54.7 %, un 21.2 % más que hace 62 años, esto es importante porque la sobrepoblación es cada vez más evidente en las ciudades. Según Tomtom Traffic Index [2], la ciudad de Istanbul ubicada en Turquía tiene el mayor porcentaje de tráfico vehicular en el mundo, con un 62 % y 142 horas perdidas por año. En cambio, la única ciudad latinoamericana en el top 10 es Bogotá en Colombia con un 55 % y 125 horas perdidas por año.

Existe un sinnúmero de razones que provocan varios problemas de movilidad, tal como la enorme cantidad de autos y el uso masivo del transporte público, pero una de las razones más importantes son las obsoletas condiciones de los sistemas de control de tráfico de las diferentes ciudades del mundo [3]. Habitualmente estas ciudades suelen ser tercermundistas y no le dan mucha importancia y atención a mejorar este problema. Los semáforos y las señales de tránsito son bastante antiguos a comparación con las tendencias mundiales, esta tecnología no cuenta con cualidades dinámicas y no se adaptan a las condiciones del tráfico de la ciudad [4]. A lo largo de estos últimos años, la calidad de vida de todas las personas se ve deteriorada y afectada por el constante crecimiento demográfico, esto es especialmente común en las ciudades en donde el tráfico vehicular aumenta diariamente, perdiendo así el tiempo de las personas [5].

El tráfico vehicular según [3], [6], [7] se produce por diferentes factores, los principales problemas son i) La tecnología anticuada que poseen muchas ciudades a nivel nacional como internacional. ii) La irresponsabilidad de los conductores al momento de transitar por las vías. iii) La enorme cantidad de automóviles que existen hasta el día de hoy. iv) El uso masivo del transporte público, por lo general, es un problema en las ciudades tercermundistas. v) El constante crecimiento

<sup>1</sup>Estudiante de Ingeniería en Ciencias de la Computación - Universidad Politécnica Salesiana, Egresado - UPS - sede Quito. Autor para correspondencia: fsanays@est.ups.edu.ec

<sup>2</sup>Magister en Redes de Comunicaciones, Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, Profesor de Ingeniería en Sistemas y Computación - UPS - sede Quito. Email: aguayo@ups.edu.ec

demográfico en ciudades en donde el tráfico vehicular aumenta diariamente.

Existen diversos efectos según Bull [3] sobre este problema:

i) El que una ciudad posea tecnología anticuada en las vías, puede producir tráfico vehicular cuando no dispone de una buena gestión del mismo. ii) La irresponsabilidad de los conductores puede provocar accidentes de tránsito graves y generar congestión vehicular. iii) Todos los autos que existen en el mundo son un gran problema ya que es uno de los principales factores para provocar tráfico en las vías. iv) Paradas constantes por parte del transporte público con el fin de llevar personas a su destino, esto puede llevar a generar estancamientos en diferentes vías. v) Compra de nuevos vehículos, al agregar más automóviles a las vías pueden generar atascos en diferentes puntos de la ciudad.

Debido al rápido crecimiento del tráfico vehicular que se producen en diferentes ciudades alrededor de todo el mundo, los investigadores han proporcionado varias soluciones sobre este gran problema con ayuda de las ciudades inteligentes o smart cities.

Para tener la visión clara de las soluciones al tráfico vehicular haciendo uso de las diferentes funcionalidades de una ciudad inteligente en los últimos 5 años; Se realiza un Mapeo Sistemático (en inglés como Systematic Mapping, SM) con tres fases y se aplica una Revisión Sistemática de la Literatura (en inglés como Systematic Literature Revision, SLR) una vez investigado e identificado de manera correcta los estudios relacionados con el tema. A continuación se enumeran las contribuciones de la investigación realizada:

- Realizar el SM y SLR basándose en la taxonomía de las soluciones al tráfico vehicular en ciudades inteligentes.
- Dividir las diferentes soluciones al tráfico vehicular basadas en herramientas como sistemas, mecanismos, modelos, esquemas y algoritmos de control.
- Analizar la evidencia empírica extrayendo las características de mayor relevancia.
- Determinar las soluciones al tráfico vehicular que obtuvieron mejores resultados.

## II. MÉTODOS Y MATERIALES

Una Smart City es una ciudad que utiliza las tecnologías de la información y de la comunicación (TICs) y otros caminos para mejorar y mitigar la calidad de vida y la eficacia de las actividades, servicios de ciudad urbana, y de la competencia en la cual participa. Asegurando así al mismo momento y tiempo la efectividad de la satisfacción de las necesidades sociales, ambientales, económicas y culturales de las descendencias presentes y futuras [8].

Los Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS) son un conjunto de alternativas que sirven como solución al alto nivel de congestión vehicular, pero no solo busca abordar este problema, también promete solucionar los altos niveles de dióxido de carbono expulsadas por los vehículos y mejorar el flujo de las carreteras. Los ITS forman parte de las ciudades

inteligentes y han aportado y ayudado enormemente con su tecnología innovadora para gestionar muchos problemas que existen en la actualidad sobre el transporte vehicular. Los ITS trabajan sobre varias redes de comunicación, en especial las redes vehiculares ad-hoc VANET, que son redes tecnológicas para gestionar el tráfico vehicular reduciendo así los atascos, los accidentes y mejorando la seguridad vial [9].

La efectividad de los ITS depende en su gran parte de la herramienta que va a utilizar para acceder, recopilar, analizar y procesar toda la información del entorno de manera precisa. Las herramientas detectan la información de dos formas, mediante el vehículo que recopila datos sobre el estado del mismo y mediante la carretera que recopila información sobre la condición del tráfico [10].

Ultimamente los investigadores de ITS se han centrado en trabajar con la computación en la nube vehicular (en inglés Vehicular Cloud Computing, VCC), este sistema ofrece grandes ventajas dentro de los ITS permitiendo una mayor visión sobre el estado de las redes viales y mejores resultados al obtener cálculos eficientes para encontrar soluciones a la congestión vehicular y que las personas puedan llegar a sus destino a tiempo [9].

Otros investigadores se han centrado en estudiar la computación de borde móvil (en inglés Mobile Edge Computing, MEC), este sistema está basado en el borde de una red móvil que ofrece gran ancho de banda, latencia muy baja y acceso en tiempo real. En esta parte también aparecen otros sistemas como i) Cómputo de niebla (en inglés Fog Computing) que permite la comunicación de todo tipo de dispositivos de borde que puedan conectarse a la red y ii) Nubecillas (en inglés Cloudlets) que son sistemas que despliegan servidores cerca de los usuarios finales. El objetivo de estos 3 sistemas es reducir la distancia que tienen los usuarios finales que se encuentran entre el borde de la red, los servidores y la información contenida en la nube. Otra ventaja de este sistema es que son capaces de combinarse con las redes VANET para obtener mejores resultados al gestionar el tráfico vehicular [11].

Muchas herramientas actualmente hacen uso de diferentes infraestructuras avanzadas para la comunicación con vehículos, pero la más mencionada y utilizada son las Unidades de Carretera (RSU) que tienen varias funciones pero las más importantes son transmitir información sobre el estado de las carreteras e información relacionada con los vehículos [9].

## III. METODOLOGÍA

Para toda la investigación se usó mapeo sistemático y revisión sistemática de la literatura. El SM se centra en el reconocimiento, definición y discusión de las soluciones al tráfico vehicular en ciudades inteligentes [12], la SLR permite planear, efectuar y dar reporte de la revisión sistemática de la literatura [13], con el fin de obtener un mejor resultado sobre las investigaciones publicadas desde el año 2018 al 2022. Guidoni [14] ha definido al Tráfico Vehicular como: “cualquier factor que produzca un problema para la movilización de vehículos generando congestión en lugares específicos”.

Para la ubicación de la metodología dentro del estado del arte se utilizó SM y SLR, y estas se clasifican en diferentes fases, las cuales son: En la fase 1 se establecen los objetivos y se identifican los criterios de selección. En la fase 2 se efectúa la revisión, se seleccionan los estudios primarios y la calidad de los mismos. En la fase 3 se da reporte a la revisión sistemática, se discuten los resultados de los estudios seleccionados, “y se da un informe de la revisión mediante las reglas con el objetivo de cumplir el SM y SLR” [13].

### III-A. FASE 1

Para la obtención de artículos que tengan relación con las diferentes soluciones al tráfico vehicular en ciudades inteligentes, se utilizó el método PICOC para describir los elementos de búsqueda en la Tabla I.

TABLA I  
DESARROLLO MÉTODO "PICOC"

<b>Population (P): ¿Quién?</b>	Tráfico Vehicular en ciudades inteligentes
<b>Intervention (I): ¿Qué?, ¿Cómo?</b>	Soluciones al tráfico vehicular
<b>Comparison (C): ¿Con qué comparar?</b>	Estudios que presenten soluciones al tráfico vehicular en ciudades inteligentes
<b>Outcomes (O): ¿Qué se busca conseguir/mejorar?</b>	Soluciones factibles para mejorar el tráfico vehicular
<b>Context (C): ¿En qué tipo de organización y bajo qué circunstancias?</b>	Revisar estudios existentes sobre las soluciones al tráfico vehicular

Luego se establecieron los términos que se harán uso para la creación y realización de la cadena de búsqueda (ver Tabla II). Se hicieron uso de las expresiones booleanas “OR” y “AND”, que formularon nuestra cadena de búsqueda de la siguiente forma: (“Traffic” OR “congestion control” OR “flow control” OR “transit”) AND (“Vehicular” OR “automobile” OR “transportation” OR “conveyance”) AND (“Solution” OR “control” OR “management” OR “correction”).

TABLA II  
TÉRMINOS PARA LA CREACIÓN Y REALIZACIÓN DE LA CADENA DE BÚSQUEDA

Términos	Términos Semejantes
Traffic	Congestion control, flow control, transit
Vehicular	Automobile, transportation, conveyance
Solution	Control, management, correction

Para finalizar con la fase 1 definimos los criterios de selección:

*III-A1. Criterios de selección de estudios:* Para la selección de los estudios más relevantes se hicieron uso de los criterios de inclusión y exclusión para SM y SLR que se detallan a continuación:

- **Criterios de inclusión:** Se definieron varios criterios en el transcurso de búsqueda en cuatro repositorios electrónicos, la selección de términos de búsqueda en los títulos y resúmenes se incluyeron en todos los artículos (ver Tabla 2), también se buscaron investigaciones experimentales o empíricas usando alternativas, herramientas, técnicas o métodos que ayuden a solucionar el tráfico vehicular en ciudades inteligentes.
- **Criterios de exclusión:** Se eliminaron todos los estudios que tenían menos de 5 hojas, artículos duplicados, artículos no escritos en inglés y artículos que no aporten información relevante sobre el dominio del tema.

### III-B. FASE 2

En esta fase se plantearon las preguntas de investigación y se definieron estrategias de búsqueda, a continuación se detalla:

*III-B1. Preguntas de Investigación:* El principal objetivo del presente estudio es actualizar y renovar el estado del arte sobre soluciones al tráfico vehicular en ciudades inteligentes, para esto se definieron varias preguntas de investigación para el Mapeo Sistemático (SMP) y para la Revisión de la Literatura Sistemática (SLRP), estas se describen a continuación:

- SMP1: ¿Existe una taxonomía para las soluciones al tráfico vehicular?
- SMP2: ¿Cuál es la distribución de los estudios relacionadas con revistas y conferencias en los últimos cinco años?
- SLRP1: ¿Cuáles son las aplicaciones tecnológicas dentro de los sistemas inteligentes de transporte?
- SLRP2: ¿Qué sistemas de control se destacan como soluciones al tráfico vehicular?
- SLRP3: ¿Qué mecanismos de control se destacan como soluciones al tráfico vehicular?
- SLRP4: ¿Qué modelos de control se destacan como soluciones al tráfico vehicular?
- SLRP5: ¿Qué esquemas de control se destacan como soluciones al tráfico vehicular?
- SLRP6: ¿Qué algoritmos se destacan en cada herramienta propuesta?
- SLRP7: ¿Qué medidas de rendimiento se utilizaron para los algoritmos encontrados?

**III-B2. Estrategias de Búsqueda:** En esta parte se utilizó la cadena de búsqueda planteada anteriormente en 4 repositorios diferentes (ver Tabla III), estos repositorios fueron seleccionados con la garantía que existan artículos suficientes para llevar a cabo un respectivo estudio de SM y SLR. En el primer filtro se encontraron 4644 estudios primarios. Dentro de todos los repositorios se estableció un rango entre los años 2018 y 2022 mejorando el patrón de búsqueda. En el segundo filtro se utilizó una herramienta de software llamada EndNote x9, la cuál sirvió de apoyo para filtrar la información implementando la cadena de búsqueda dentro del título y resumen, el resultado del filtrado fue notable, ya que la cantidad de estudios se redujo a 294. En el tercer filtro se descargaron todos los artículos que quedaron del segundo filtro y se procedió a leer cada uno de ellos, descartando así todos los textos que no respetaban con los criterios de inclusión y exclusión para finalmente seleccionar 60 estudios.

### III-C. FASE 3

En esta fase se procedió a extraer los datos o la información mediante la revisión de cada artículo encontrado en la fase anterior. Gracias a estos datos se responden a las preguntas de investigación para la SM y SLR respectivamente. Luego de la extracción de información de cada estudio, se sintetizan los datos en forma de una taxonomía (ver Figura 1) con el fin de tener la convicción para contestar de manera eficiente todas las preguntas del estado del arte.



Figura 1. Taxonomía de las soluciones al tráfico vehicular en ciudades inteligentes

**III-C1. Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS):** Los Sistemas de Transporte Inteligentes son considerados como una arquitectura avanzada y juegan un papel importante en la creación de sistemas innovadores, resilientes, inteligentes y sostenibles con un costo menor en comparación con la ampliación y mantenimiento de la infraestructura vial [11]. Los ITS utilizan una multitud de tecnologías para gestionar el tráfico vehicular. Como resultado del rápido desarrollo de la industria automotriz, las soluciones ITS se han vuelto aún más populares en todo el mundo y serán un gran apoyo para la próxima generación de Ciudades Inteligentes [15].

En los estudios revisados, los investigadores se enfocan en los ITS en donde existen una gran cantidad y variedad de aplicaciones tecnológicas con soluciones al tráfico vehicular.

**III-C2. Aplicaciones Tecnológicas en ITS:** En los estudios realizados en la literatura, se encontraron varias aplicaciones de algunas tecnologías que se apoyan con los Sistemas Inteligentes de Transporte para generar un mejor control del tráfico vehicular. Las aplicaciones tecnológicas identificadas en la literatura se organizan y se pueden visualizar en la Figura 2, y se categorizan en 2 grupos:

i) Redes de Comunicación, son un grupo de organismos conectados entre sí que permite el movimiento de elementos tangibles o intangibles según algunos protocolos definidos de manera correcta. La palabra red se relaciona con un grupo de sistemas informáticos individuales conectados entre ellos, con el fin de que se tenga la posibilidad de una emisión y recepción de datos, para esto es importante tener una conexión física y una conexión lógica de los sistemas. ii) Otras aplicaciones, esta parte esta conformada por otras tecnologías que son aplicadas en los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS).

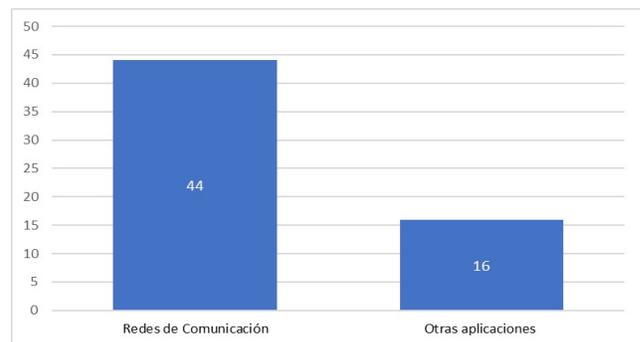


Figura 2. Distribución de las Aplicaciones en ITS

**III-C3. Herramientas:** En los estudios revisados en la literatura, se encontraron varias soluciones para controlar el tráfico vehicular que usan las tecnologías mencionadas anteriormente y a la vez, estas tecnologías se apoyan en los ITS también mencionados anteriormente. Las soluciones de control vehicular identificadas en la literatura se categorizan en 4 grupos (ver Figura 3).

i) Sistemas de control vehicular, ii) Mecanismos de control vehicular, iii) Modelos de control vehicular, iv) Esquemas de control vehicular. Todas estas soluciones funcionan como herramientas para poder controlar y gestionar de manera eficiente el tráfico vehicular. La mayoría de herramientas son desarrolladas e implementadas por parte de los propios investigadores.

**III-C4. Algoritmos:** Existen miles de algoritmos que permiten resolver tareas específicas, estos se pueden implementar en varias herramientas de software, en este caso en herramientas de control vehicular. Por parte de la investigación se categorizan diferentes algoritmos, la mayor parte de ellos son planteados por los propios investigadores y el resto son

TABLA III  
CADENA DE BÚSQUEDA EN CADA REPOSITORIO

Repositorio	Cadena de Búsqueda	Tipo Artículo	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3
IEEE	("All Metadata":"traffic" OR "All Metadata":"congestion control" OR "All Metadata":"flow control" OR "All Metadata":"transit") AND ("All Metadata":"vehicular" OR "All Metadata":"automobile" OR "All Metadata":"transportation" OR "All Metadata":"conveyance") AND ("All Metadata":"solution" OR "All Metadata":"control" OR "All Metadata":"management" OR "All Metadata":"correction")	Revista	1683	134	6
Science Direct	Title, abstract, keywords: ("Traffic" OR "congestion control" OR "flow control") AND ("Vehicular" OR "transportation" OR "conveyance") AND ("Solution" OR "management" OR "correction")	Revista y Conferencia	1109	61	8
SCOPUS	(TITLE-ABS-KEY("Traffic" OR "congestion control" OR "flow control" OR "transit")) AND (TITLE-ABS-KEY("Vehicular" OR "automobile" OR "transportation" OR "conveyance")) AND (TITLE-ABS-KEY("Solution" OR "control" OR "management" OR "correction"))	Revista y Conferencia	941	544	37
ACM	[[Title: traffic] OR [Title: congestion control] OR [Title: flow control] OR [Title: transit]] AND [[Title: vehicular] OR [Title: automobile] OR [Title: transportation] OR [Title: conveyance]] AND [[Title: solution] OR [Title: control] OR [Title: management] OR [Title: correction]] AND [[Abstract: traffic] OR [Abstract: congestion control] OR [Abstract: flow control] OR [Abstract: transit]] AND [[Abstract: vehicular] OR [Abstract: automobile] OR [Abstract: transportation] OR [Abstract: conveyance]] AND [[Abstract: solution] OR [Abstract: control] OR [Abstract: management] OR [Abstract: correction]]	Revista y Conferencia	911	55	20
TOTAL			4644	294	60

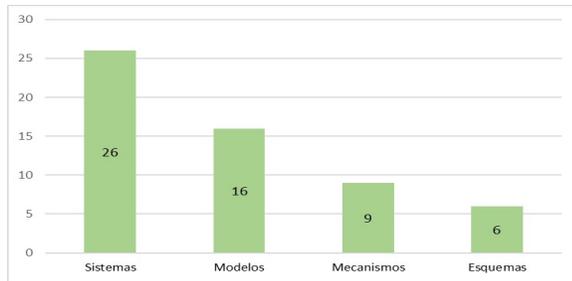


Figura 3. Distribución de Herramientas

existentes y conocidos como técnicas de aprendizaje, entre otros. Estos se detallan en la Figura 4.

i) Algoritmos propios (AP), son algoritmos que cada investigador planteó e implementó en alguna herramienta de control, siendo estos utilizados como alternativa para mitigar el problema del tráfico vehicular. ii) Q-Learning, es un algoritmo que resuelve problemas de decisión continua, esto quiere decir que la productividad de una acción depende de una serie de decisiones. iii) Máquina de Soporte Vectorial (SVM), son algoritmos de aprendizaje supervisado que son utilizados para resolver problemas de regresión y clasificación. iv) Algoritmo de Colonia de Hormigas (ACO), es un algoritmo que se utiliza para facilitar la obtención de una ruta de viaje corta. v) Dijkstra, es un algoritmo que sirve para encontrar el camino o ruta más corta desde un punto de origen a todos los demás puntos de un grafo. vi) Fuzzy Logic (FL), son algoritmos basados en lógica difusa que permite tomar decisiones en tiempo real con la vaguedad de la información dada. vii) Otros algoritmos (OA) no tan conocidos también se han encontrado

en la literatura que ofrecieron una solución viable para resolver el problema del tráfico vehicular.

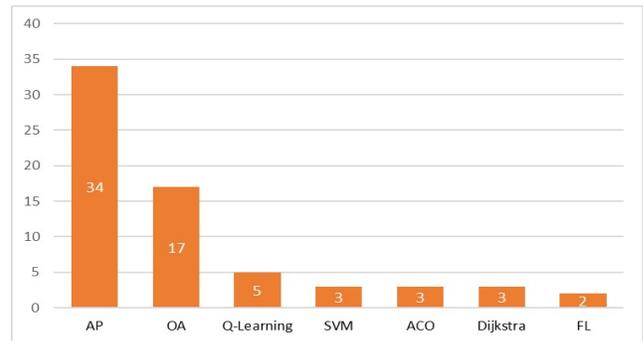


Figura 4. Distribución de todos los Algoritmos

III-C5. *Redes de Comunicación en ITS*: En los estudios revisados en la literatura se encontraron varias redes de comunicación, las cuáles se categorizan en 2 grupos (ver Figura 5). i) Redes Vehiculares (VANET), tienen como objetivo mejorar la comodidad y seguridad de los pasajeros y conductores a través de vehículos inteligentes equipados con sensores internos, memoria, procesamiento y capacidades de comunicación inalámbrica [15]. ii) Otras Redes, en este grupo se encuentran otras redes vehiculares (RV), así también como otras redes distintas tales como Redes Móviles (RM), Redes definidas por Software (RDS) y Redes Distribuidas (RD). Estas redes son herramientas informáticas conectadas unas a otras mediante una cadena de artefactos alámbricos o inalámbricos, esto permite compartir información en paquetes de datos que se transmiten mediante ondas electromagnéticas, impulsos eléctricos, o cualquier otro medio. En la Figura 6

se tiene una mejor perspectiva de la distribución de las otras redes de comunicación, y también se puede visualizar las que se destacan.

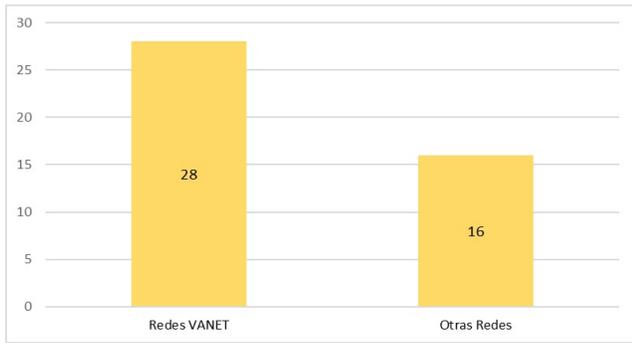


Figura 5. Distribución de Redes de Comunicación

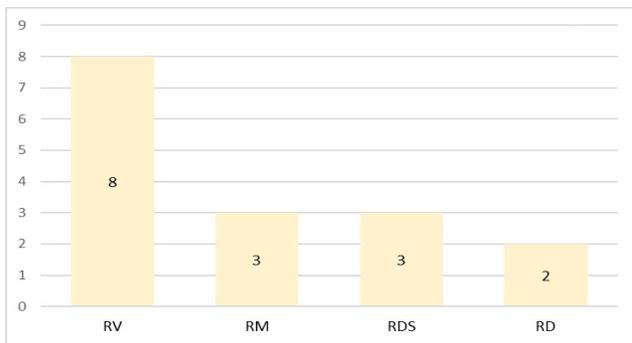


Figura 6. Distribución de otras redes distintas

**III-C6. Sistemas de control vehicular en redes de comunicación:** Para la implementación de las aplicaciones en ITS en los estudios revisados en la literatura, se utilizaron Sistemas de control vehicular en diferentes redes de comunicación que sirven para monitorear y reducir los atascos de tráfico con la finalidad de mejorar la movilidad vehicular. Los Sistemas que han sido utilizados en las redes de comunicación se las describen en la Tabla IV.

Como se puede observar en la Tabla IV, la recurrencia de algunos Sistemas de control vehicular es notable. Los que más se destacan son VCC (RV-S1), MEC (RV-S3) y Fog Computing (RV-S4). Esta distribución se la puede observar en la Figura 7.

La herramienta VCC (RV-S1) se ha usado para almacenar todos los datos que se generan por parte de los vehículos, de las carreteras o de infraestructuras externas en [11], [9], [16], [14], [17] y [18]:

En [11] se desarrolla un sistema que asigna un plaza en un estacionamiento público de manera inteligente, toda la información generada por parte de los estacionamientos, el estado de las vías y el estado del vehículo se almacenan para luego ser utilizados de manera segura dentro del sistema propuesto.

TABLA IV  
SISTEMAS DE CONTROL VEHICULAR USADOS EN REDES DE COMUNICACIÓN

Etq	Sistema	Categoría	Referencias
RV-S1	VCC	Redes VANET	[11], [9], [16], [14], [17], [18]
RV-S2	Cloudlets	Redes VANET	[11], [16]
RV-S3	MEC	Redes VANET	[11], [19], [15], [20], [16]
RV-S4	Fog Computing	Redes VANET	[11], [20], [16], [21]
RV-S6	EvoTSC	Redes VANET	[22]
RV-S8	CoNeCT	Redes VANET	[15]
RV-S10	dEASY	Redes VANET	[23]
RV-S11	CITLA	Redes VANET	[9]
RV-S12	S/N	Redes VANET	[21]
RV-S18	Re-RouTE	Redes VANET	[14]
RV-S22	DDP4V	Redes VANET	[24]
RV-S26	VNDN	Redes VANET	[25]
RV-S27	FDMS	Redes VANET	[20]
RV-S28	CACC	Redes VANET	[26]
RV-S29	S/N	Redes VANET	[17]
RV-S31	ToA	Redes VANET	[18]
OR-S5	BCOOL	Otras Redes (RDS)	[16]
OR-S23	FITCCS-VN	Otras Redes (RV)	[27]
OR-S24	S/N	Otras Redes (RV)	[28]
OR-S30	S/N	Otras Redes (RV)	[29]

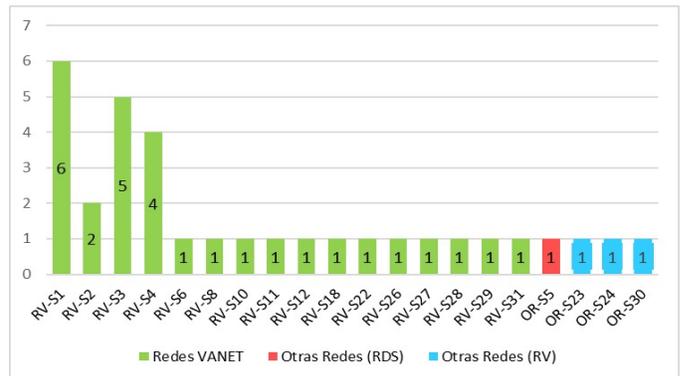


Figura 7. Recurrencia del uso de Sistemas de control vehicular en Redes de comunicación

En [9] se desarrolla un sistema llamado CITLA para controlar el tráfico vial en redes VANET usando la nube vehicular como proveedor de servicios. Estos servicios en la nube son los encargados de calcular el tiempo de espera de cada vehículo en la carretera y el estado de las carreteras para elegir la mejor forma de liberar vías congestionadas mediante instrucciones, que la nube vehicular emitirá a las Unidades de Carretera (RSU). Entonces estas RSU se encargarán de controlar el tráfico vehicular mediante las instrucciones que recibe por parte de la nube.

En [16] se desarrolla un sistema para predecir la congestión de los datos de redes vehiculares llamado BCOOL. Este sistema consiste de 3 fases, la primer fase se encarga de administrar

la información de cada vehículo, la segunda fase se encarga de almacenar información en tiempo real sobre el tráfico vehicular y la tercer fase se encarga de todos los vehiculos en tiempo real. BCOOL obtuvo resultados favorables por encima de otros sistemas, prediciendo con anticipación el tráfico de manera rápida, consistente y precisa, y sobre todo de manera segura.

En [14] se desarrolla un sistema llamado Re-RouTE que reduce la congestión del tráfico vehicular en densos escenarios urbanos. Este sistema utiliza el modelo de densidad de flujo de la teoría de Ingeniería de tráfico para clasificar la congestión de la red. Re-Route considera la densidad de las carreteras y lo utiliza para detectar, sugerir y clasificar nuevas rutas que no esten congestionadas.

En [17] se desarrolla un sistema que envía información al vehículo y que el conductor la recibe, esta información se basa en rutas alternativas si es que se detecta algún evento no deseado como el tráfico vehicular. El sistema también es capaz de detectar emergencias y enviar advertencias de seguridad al vehículo, todo esto mediante una red VANET.

En [18] se desarrolla un sistema inteligente para monitorear el tráfico vehicular dentro del servicio de la computación en la nube vehicular. Se usó un algoritmo de seguridad en redes VANET en tiempo real y el concepto teórico que se utilizó fue la detección de accidentes, la prevención de colisiones y el modelo de cambio de carril en carreteras basado en la velocidad del mismo. El resultado fue la prevención de accidentes por cambiar a carriles inadecuados y la reducción de la congestión del tráfico vehicular.

La herramienta Cloudlets (RV-S2) se ha usado en [11] y [16]:

En [11] se desarrolla un sistema para encontrar una vía de corta distancia de viaje para los vehículos y para ayudar a los transportistas a evitar accidentes. Los vehículos usan el servicio en la nube para solicitar los datos que requieran.

En [16] también se hace uso de esta herramienta, específicamente en la fase 2 del sistema BCOOL. Usa el servicio de la nube para almacenar información en tiempo real sobre la congestión vehicular.

La herramienta MEC (RV-S3) se basa en el borde de una red móvil para almacenar toda la información que se transmite y se recibe entre un vehículo y un teléfono. Este se ha usado en [11], [19], [15], [20] y [16]:

En [11] se desarrolla un sistema para controlar el tráfico vehicular mediante la coordinación de los vehículos en cada intersección según el tipo de vehículo. Los tipos son vehículos heredados y vehículos que usan comunicación inalámbrica con otros vehículos. El sistema propone algoritmos y los selecciona según el tipo de intersección y tipo de vehículo para ser ejecutados.

En [19], se desarrolla un sistema para controlar la cantidad de recursos de comunicaciones móviles utilizados en vehículos que se encuentran cruzando intersecciones de calles.

En [15] se desarrolla un sistema llamado CoNeCT que predice de manera efectiva los atascos en zonas urbanas con redes VANET. Por esta razón CoNeCT es capaz de tomar buenas desiciones para anticipar el tráfico vehicular.

En [20] se desarrolla un sistema llamado FDMS basado en lógica difusa para mantener la seguridad al momento de conducir mediante la conciencia situacional del conductor con la computación de borde móvil.

La herramienta Fog Computing (RV-S4) se ha usado para complementar la herramienta MEC (RV-S3), ya que permite la comunicación de todos los dispositivos de borde conectados a la red en [11], [20], [16] y [21]:

En [11] se desarrolla un sistema que se conecta con las RSU para recopilar información sobre el tráfico de los vehículos y para sugerir rutas adecuadas de viaje. En [20] también se trabaja con esta herramienta ya que controla todos los dispositivos de borde que estén conectados a la red.

En [21] se desarrolla un sistema para reducir el tráfico vehicular mediante la comunicación entre las RSU y los vehículos. El sistema se implementa en cada RSU para que reciba información sobre el estado actual de las carreteras y que cada vehículo solicite esa información para encontrar una nueva ruta en caso de que la ruta actual este congestionada.

*III-C7. Algoritmos usados en Sistemas de control vehicular en redes de comunicación:* Dentro de cada Sistema de control vehicular se han hecho uso de varios algoritmos que sirvieron de apoyo para la gestión y el control del mismo. En la Figura 8 los algoritmos con más frecuencia que se han utilizado son: i) Algoritmo Propio (AP) como en [15], [23], [9], [21], [26], [14], [28], [25], [29] y [18] que implementan algoritmos desarrollados por cada investigador en su estudio presentado, y que luego lo implementan en cada sistema de control vehicular. ii) Algoritmo de Colonia de Hormigas (ACO) como en [11], [22] y [34] que implementan este algoritmo para buscar una alternativa de ruta más corta entre todas la existentes. iii) Máquina de Soporte Vectorial (SVM) como en [19] y [27] que implementan este algoritmo para predecir la congestión del tráfico vehicular mediante un proceso de clasificación y que producen lógica utilizando reglas difusas.

En los estudios revizados en la literatura también se encontraron otros algoritmos que su uso fue único y también se puede visualizar en la Figura 8: i) Frank-Wolfe como en [22] que implementa este algoritmo para complementar un método realista llamado asignación de tráfico estocástico. ii) Predicción del árbol de desición (J48) como en [19] que implementa este algoritmo como clasificador de referencia para predecir el flujo de tráfico entrante. iii) Inmortal Forwarding (IF) como en [24] que implementa este algoritmo para seleccionar un vehículo vecino para la transmisión de datos en función de la distancia del próximo vehículo y la densidad del vehículo de origen. iv) Artificial neural network (ANN) como en [27] que implementa este algoritmo para predecir la congestión del tráfico vehicular mediante un proceso de clasificación.

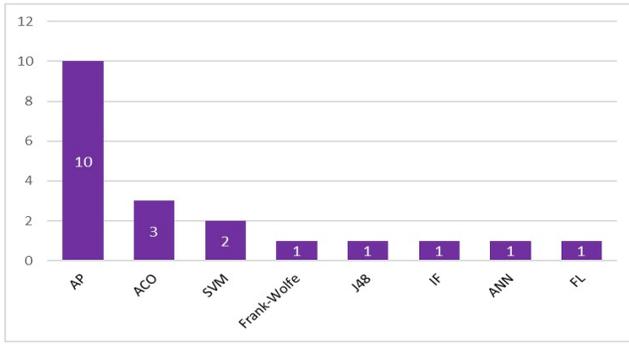


Figura 8. Recurrencia del uso de algoritmos en Sistemas de control vehicular en Redes de comunicación

v) Lógica Difusa (FL) como en [20] que implementa este algoritmo en un sistema de monitoreo de conductores para la toma de decisiones en tiempo real basado en la vaguedad de la información dada.

Además en [11] también se mencionan partes teóricas y prácticas de otros algoritmos como SPA, Dijkstra, ELM, NDT, CARA, Q-Learning y en [16] algoritmos como MLR, K-Means y Random Forest (RF).

*III-C8. Mecanismos de control vehicular en redes de comunicación:* Para la implementación de las aplicaciones en ITS se utilizaron Mecanismos de control vehicular en diferentes redes de comunicación que sirven de apoyo para gestionar el control del tráfico vehicular de manera eficiente. Los Mecanismos que han sido utilizados en las redes de comunicación se las describen en la Tabla V.

TABLA V  
MECANISMOS DE CONTROL VEHICULAR USADOS EN REDES DE COMUNICACIÓN

Etq	Mecanismo	Categoría	Referencias
RV-M1	Basado en Blockchain	Redes VANET	[30]
RV-M2	DisTraC	Redes VANET	[31]
RV-M3	CIAC	Redes VANET	[32]
RV-M4	DBDC	Redes VANET	[33]
RV-M5	DCC	Redes VANET	[34], [35], [36], [37]
RV-M6	CPMRA	Redes VANET	[35]
RV-M7	CPDRA	Redes VANET	[35]
RV-M8	IRQ	Redes VANET	[38]
OR-M9	VNDN	Otras Redes (RM)	[39]
OR-M10	S/N	Otras Redes (RV)	[37]
OR-M11	PRAIOS	Otras Redes (RD)	[36]

Como se puede observar en la Tabla V, la recurrencia de un solo Mecanismo de control vehicular es evidente. El que se destaca es el Mecanismo DCC (RV-M5). Esta distribución se la puede observar en la Figura 9.

La herramienta DCC (RV-M5) se ha usado para gestionar

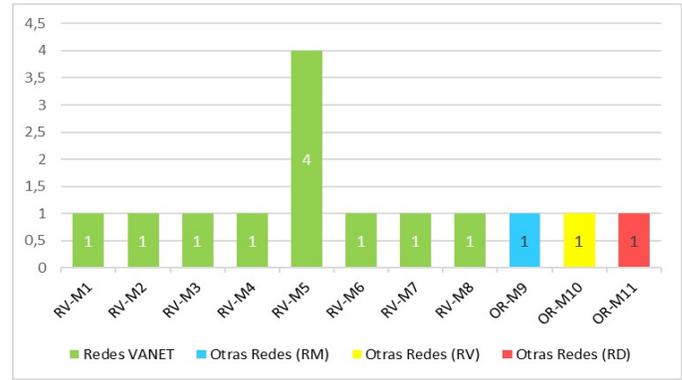


Figura 9. Recurrencia del uso de Mecanismos de control vehicular en Redes de comunicación

la carga del CBR y garantizar la comunicación confiable de los vehículos en [34], [35], [36] y [37]:

En [34] se desarrolla un mecanismo para controlar la potencia de transmisión dinámica de las comunicaciones vehiculares mediante 2 parámetros como la velocidad de generación de mensajes y la velocidad de datos, garantizando una comunicación confiable.

En [35] se desarrollan dos mecanismos llamados CPDRA que controla la potencia y consigue la adaptación de la tasa de mensajes para mantenerse en el canal CBR mucho más tiempo que otras técnicas al conservar el tráfico en los límites definidos y CPMRA que también controla la potencia y la adaptación de la tasa de mensajes pero el tiempo en el canal CBR está debajo del umbral definido.

En [36] se desarrolla un mecanismo llamado PRAIOS que permite indicar una noción de igualdad deseada y definir varias prioridades a vehículos inteligentes mediante una optimización de tarifa distribuida y conciencia en redes VANET.

En [37] se desarrolla un mecanismo que sirve para mejorar la eficiencia del canal CBR mediante la información que se transmite en tiempo real, el mecanismo es comparado con otro mecanismo y evidencia la efectividad y la mejora que provee el mismo. Generando así la confiabilidad de los datos.

*III-C9. Algoritmos usados en Mecanismos de control vehicular en redes de comunicación:* También, dentro de cada Mecanismo de control vehicular se han hecho uso de varios algoritmos que sirvieron de apoyo para la gestión y el control del mismo. En la Figura 10, el algoritmo con más frecuencia que se ha utilizado es: Algoritmo Propio (AP) como en [31], [33], [34], [37], [35] y [36] que implementan algoritmos desarrollados por cada investigador en su estudio presentado, y que luego lo implementan en cada mecanismo de control vehicular.

En los estudios revisados en la literatura también se encontraron otros algoritmos que su uso fue único y también se los puede visualizar en la Figura 10: i) Boneh Lynn Shacham (BLS) como en [30] que implementa este algoritmo de verificación por lotes basado en la firma del grupo BLS para garantizar la solvencia de problemas y riesgos de

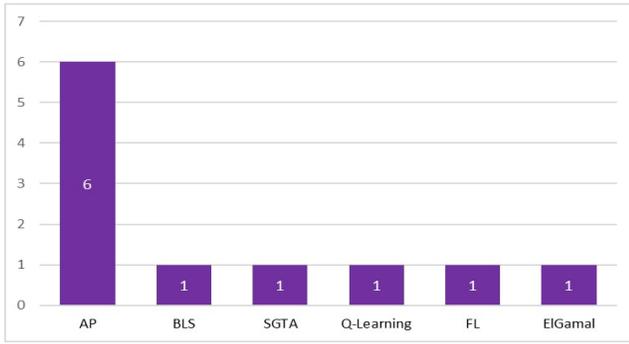


Figura 10. Recurrencia del uso de algoritmos en Mecanismos de control vehicular en Redes de comunicación

seguridad de la información transmitida desde el vehículo. ii) Strategic Game Theoretic Algorithm (SGTA) como en [32] que implementa este algoritmo conocido en el mundo de los juegos virtuales modernos para decidir si el vehículo participará como cabeza de grupo o no con un costo de conectarse a una red VANET. iii) Q-Learning como en [38] que implementa este algoritmo para redes VANET con el objetivo de encontrar las mejores rutas entre intersecciones mediante una técnica de enrutamiento. iv) Lógica Difusa (FL) como en [39] que implementa este algoritmo de procesamiento de imágenes para gestionar la densidad del tráfico vehicular en una intersección de 2 vías. v) ElGamal como en [30] que implementa un algoritmo de cifrado para asegurar la confidencialidad e integridad de los datos transmitidos desde el vehículo.

*III-C10. Modelos de control vehicular en redes de comunicación:* Otra implementación de las aplicaciones en ITS que se utilizaron fueron los Modelos de control vehicular en diferentes redes de comunicación que sirven para definir estrategias de apoyo para corregir el tráfico vehicular de manera adecuada y eficiente. Los Modelos de control vehicular que han sido utilizados se los describen en la Tabla VI.

Como se puede observar en la Tabla VI, la recurrencia de 2 Modelos de control vehicular es evidente. Los que se destacan son VCC (RV-MO3) y SDVN (OR-MO4). Esta distribución se la puede observar en la Figura 11.

La herramienta VCC (RV-MO3) se ha usado en [40], [41], [42] y [43]:

En [40] se desarrolla un modelo para el control de semáforos inteligentes asistidos por la herramienta VCC y redes VANET. Este modelo tiene el objetivo de incrementar la posibilidad de despejar el tráfico vehicular en varias intersecciones de vías y ayudar en el flujo de tráfico diario.

En [42] se desarrolla un modelo para controlar el tráfico vehicular y reducirlo. Se lo realiza controlando vehículos inteligentes mediante señales que son transmitidas por redes vehiculares. Esto se hace con cuidados ecológicos para

TABLA VI  
MODELOS DE CONTROL VEHICULAR USADOS EN REDES DE COMUNICACIÓN

Etq	Modelo	Categoría	Referencias
RV-MO2	S/N	Redes VANET	[40]
RV-MO3	VCC	Redes VANET	[40], [41], [42], [43]
RV-MO6	S/N	Redes VANET	[44]
RV-MO7	Multi-Hop	Redes VANET	[45]
RV-MO10	S/N	Redes VANET	[42]
RV-MO11	DNN-IoT-BA	Redes VANET	[46]
RV-MO12	NCGACC	Redes VANET	[47]
OR-MO1	MPEC	Otras Redes (RV)	[48]
OR-MO14	DSRC	Otras Redes (RV)	[49]
OR-MO17	S/N	Otras Redes (RV)	[50]
OR-MO4	SDVN	Otras Redes (RDS)	[41], [43]
OR-MO13	SeDaTiVe	Otras Redes (RDS)	[43]
OR-MO19	S/N	Otras Redes (RD)	[51]

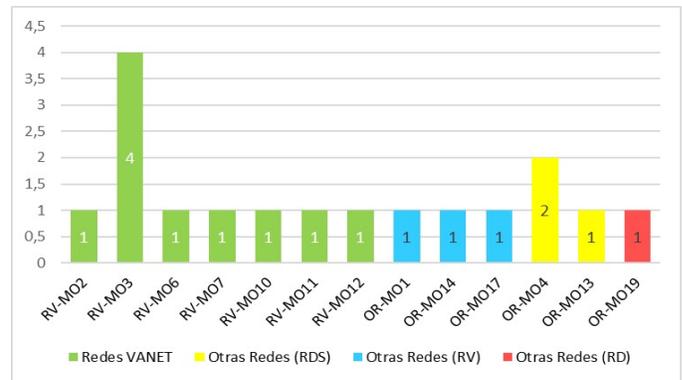


Figura 11. Recurrencia del uso Modelos de control vehicular en Redes de comunicación

garantizar la efectividad del modelo propuesto.

La herramienta SDVN (OR-MO4) se ha usado en [41] y [43]:

En [41] se desarrolla un modelo que utiliza redes vehiculares definidas por software llamado SDVN. Este modelo es capaz de encontrar ubicaciones ideales para posicionar los interruptores y controladores con el fin de conservar un carga igualada con los otros controladores y para disminuir el retraso de la comunicación.

En [43] se desarrolla un modelo llamado SeDaTiVe basado en redes definidas por software que sirve para controlar el tráfico de la red y definir rutas adecuadas por las cuales serán transmitidos los paquetes. La efectividad del modelo se mide con varias métricas como la PDR, demostrando su superioridad ante otros modelos. Toda esta información se almacena en la nube computacional vehicular.

*III-C11. Algoritmos usados en Modelos de control vehicular en redes de comunicación:* También, dentro de cada Modelo de control vehicular se han hecho uso de varios algoritmos que sirvieron de apoyo para la gestión y el control

del mismo. En la Figura 12, el algoritmo con más frecuencia que se ha utilizado es: Algoritmo Propio (AP) como en [48], [40], [44], [45], [42], [47], [50], [43], [49] y [51] que implementan algoritmos desarrollados por cada investigador en su estudio presentado, y que luego lo implementan en cada modelo de control vehicular.

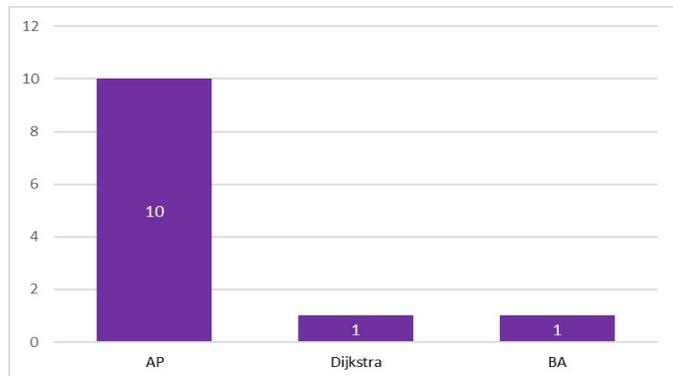


Figura 12. Recurrencia del uso de algoritmos en Modelos de control vehicular en Redes de comunicación

En los estudios revisados en la literatura también se encontraron otros algoritmos que su uso fue único y también se los puede visualizar en la Figura 12: i) Dijkstra en [41] que implementa este algoritmo para redes definidas por software que están presentes con varios controladores y conmutadores con el fin de asignar la ruta más corta entre dos puntos o nodos. ii) Bat Algorithm (BA) en [46] que implementa este algoritmo para encontrar un punto aleatorio con una nueva posición y velocidad que se actualizan en un tiempo determinado para predecir posibles eventos en las vías.

*III-C12. Esquemas de control vehicular en redes de comunicación:* Otra implementación de las aplicaciones en ITS que se utilizaron fueron los Esquemas de control vehicular en diferentes redes de comunicación que sirven para plantear una solución y así dar una buena gestión al tráfico vehicular de manera eficiente. Los Esquemas de control vehicular que han sido utilizados se los describen en la Tabla VII.

TABLA VII  
ESQUEMAS DE CONTROL VEHICULAR USADOS EN REDES DE COMUNICACIÓN

Etq	Esquema	Categoría	Referencias
RV-E1	VTC	Redes VANET	[52]
RV-E2	RSU	Redes VANET	[52], [53]
OR-E3	RTW-TCP	Otras Redes (RM)	[54]
OR-E4	S/N	Otras Redes (RM)	[55]
OR-E6	S/N	Otras Redes (RV)	[53]

Como se puede observar en la Tabla VII, la recurrencia de un solo Esquema de control vehicular es evidente. El esquema que se destaca es RSU (RV-E2). Esta distribución se la puede observar en la Figura 13.

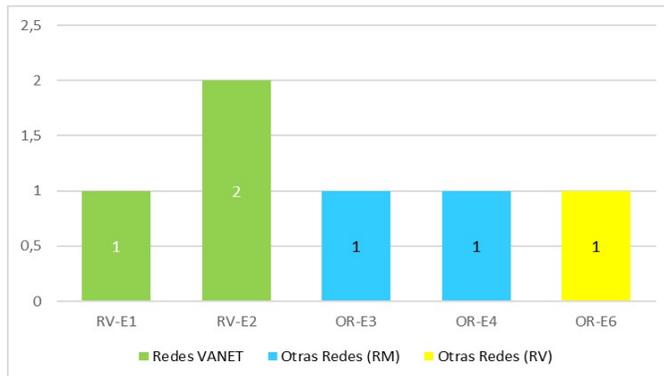


Figura 13. Recurrencia del uso de Esquemas de control vehicular en Redes de comunicación

La herramienta RSU (RV-E2) se ha usado para extraer la información necesaria sobre el tráfico vehicular en tiempo real mediante las RSU, en [52] y [53]:

En [52] se desarrolla un esquema llamado VTC con mínimos costos que hace uso de infraestructuras RSU para comunicar al vehículo todo lo que debe saber para tomar la decisión de encaminarse por una ruta disponible y no congestionada. El esquema propuesto mejora notablemente el PDR a comparación de otros esquemas revisados.

En [53] se desarrolla un esquema para controlar el flujo del tráfico mediante el aumento de claves criptográficas. El esquema propuesto logra disminuir el tiempo total de ejecución gracias a que se previene la transmisión de claves innecesarias. Además se incrementa la seguridad de los conductores con la ayuda de los RSU que transmiten en tiempo real toda la información necesaria.

*III-C13. Algoritmos usados en Esquemas de control vehicular en redes de comunicación:* También, dentro de cada Esquema de control vehicular se han hecho uso de varios algoritmos que sirvieron de apoyo para la gestión y el control del mismo. El único algoritmo que se ha utilizado 4 veces en esquemas es: Algoritmo Propio (AP) en [52], [54], [55] y [53] que implementan algoritmos desarrollados por cada investigador en su estudio presentado, y que luego lo implementan en cada esquema de control vehicular.

*III-C14. Otras aplicaciones en ITS:* En los estudios revisados en la literatura también se ha encontrado otras aplicaciones que utilizan los ITS, las cuales se categorizan en 3 grupos (ver Figura 14). i) Señales de Tránsito Inteligentes, tienen la tarea de ordenar el tránsito vehicular mediante alertas al conductor sobre la congestión en el lugar donde se encuentra ubicado. ii) Vehículos Inteligentes, es aquel vehículo cuyas plataformas tecnológicas dan acceso a sus usuarios para obtener información y funcionalidades de valor que impactan en la experiencia de uso de un vehículo. iii) Otros, en esta parte se ubican otras aplicaciones que no son muy conocidas ni usadas.

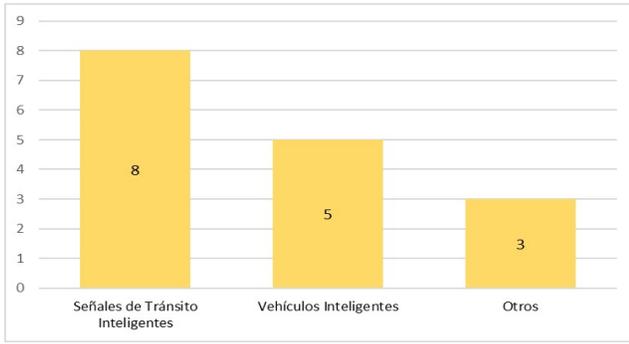


Figura 14. Distribución de Otras Aplicaciones

**III-C15. Sistemas de control vehicular en otras aplicaciones:** Se encontraron Sistemas de control vehicular que han sido usados en otras aplicaciones dentro de ITS. Los Sistemas que han sido utilizados se los describen en la Tabla VIII.

TABLA VIII  
SISTEMAS DE CONTROL VEHICULAR USADOS EN OTRAS APLICACIONES

Etq	Sistema	Categoría	Referencias
VI-S7	multi-AGV	Vehículos Inteligentes	[56]
VI-S16	S/N	Vehículos Inteligentes	[57]
VI-S21	MRT	Vehículos Inteligentes	[58]
STI-S13	DITCLS	Señales de Tránsito Inteligentes	[59]
STI-S14	PrivacySignal	Señales de Tránsito Inteligentes	[60]
STI-S15	S/N	Señales de Tránsito Inteligentes	[61]
STI-S19	TSCS	Señales de Tránsito Inteligentes	[62]
STI-S25	ATLCS	Señales de Tránsito Inteligentes	[63]
O-S17	S/N	Otros	[64]
O-S20	RFID	Otros	[65]

Como se puede observar en la Tabla VIII, la recurrencia de cada Sistema de control vehicular es única. Esta distribución se la puede observar en la Figura 15.

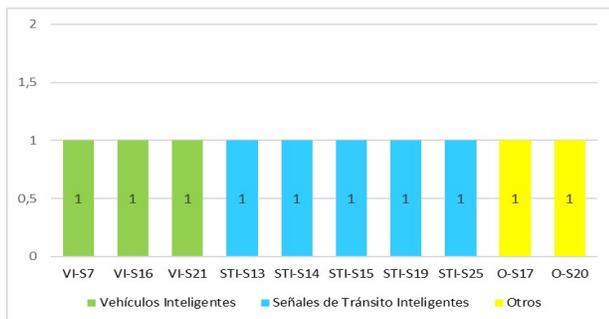


Figura 15. Recurrencia del uso de Sistemas de control vehicular en Otras Aplicaciones

**III-C16. Algoritmos usados en Sistemas de control vehicular en otras aplicaciones:** Dentro de cada Sistema de control vehicular se han usado varios algoritmos que sirvieron de apoyo para la gestión y el control del mismo. En la Figura 16, los algoritmos utilizados con mayor frecuencia son: i) Algoritmo Propio como en [59], [61], [57], [58] y [63] que implementan algoritmos desarrollados por cada investigador en cada sistema de control vehicular propuesto. ii) Q-Learning como en [60] y [62] que implementan este algoritmo para definir el tiempo de luz verde de semáforos que se encuentran en varias intersecciones y también hace un conteo de todos los vehículos que hay en cada carril.

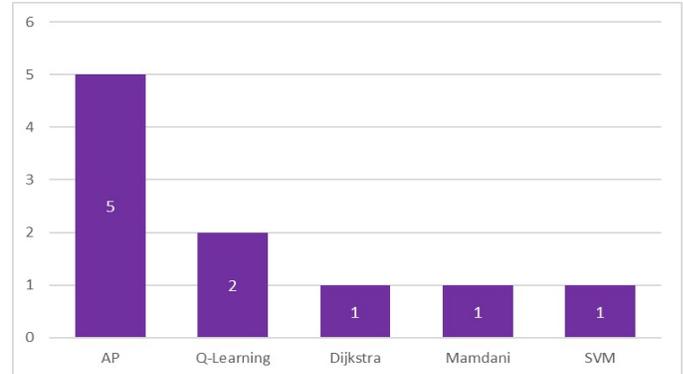


Figura 16. Recurrencia del uso de algoritmos en Sistemas de control vehicular en Otras Aplicaciones

En los estudios revisados en la literatura también se ha encontrado otros algoritmos que su uso fue único y también se los puede visualizar en la Figura 16: i) Dijkstra en [56] que implementa este algoritmo para definir una ruta topológica que permita comprender el seguimiento de lugares por donde debe pasar el vehículo durante su trayecto. ii) Mamdani en [64] que implementa este algoritmo para determinar varios parámetros cambiantes, como el límite de velocidad, el porcentaje de vehículos pesados y el número de carriles con el fin de convertirlos en información limpia. iii) SVM en [65] que implementa este algoritmo para clasificar de manera eficiente grupos de datos que provienen del vehículo y las carreteras.

**III-C17. Mecanismos de control vehicular en otras aplicaciones:** En los estudios revisados en la literatura solo se encontraron Mecanismos de control vehicular en redes de comunicación, y ningún mecanismo de control vehicular usado en otras aplicaciones dentro de ITS. Por ende en esta parte no se encuentra ningún algoritmo implementado

**III-C18. Modelos de control vehicular en otras aplicaciones:** También se encontraron algunos Modelos de control vehicular que han sido usados en otras aplicaciones dentro de ITS. Los modelos que han sido utilizados se los describen en la Tabla IX.

TABLE IX  
MODELOS DE CONTROL VEHICULAR DE USO EN OTRAS APLICACIONES

Etq	Modelo	Categoría	Referencias
STI-MO5	Knowledge Compilation	Señales de Tránsito Inteligentes	[66]
STI-MO8	S/N	Señales de Tránsito Inteligentes	[67]
STI-MO16	RL	Señales de Tránsito Inteligentes	[67], [66]
VI-MO9	S/N	Vehículos Inteligentes	[68]
VI-MO18	S/N	Vehículos Inteligentes	[69]
O-MO15	S/N	Otros	[70]

Como se puede observar en la Tabla IX, la recurrencia de un solo Modelo de control vehicular es evidente. El modelo que se destaca es RL (STI-MO16). Esta distribución se la puede observar en la Figura 17.

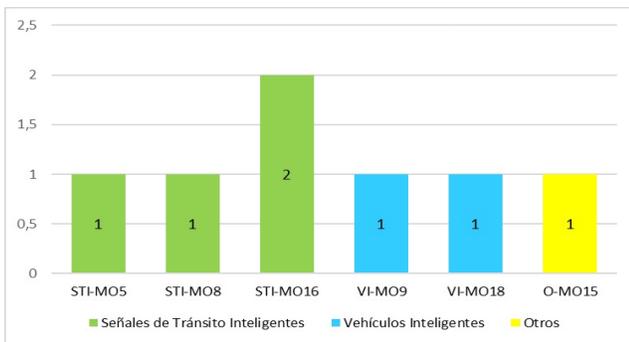


Figura 17. Recurrencia del uso Modelos de control vehicular en Otras Aplicaciones

La herramienta RL (STI-MO16) se implementa en semáforos inteligentes para controlar las fases del mismo según el estado de tráfico vehicular mediante controladores ubicados estratégicamente, en [67] y [66]:

En [66] se desarrolla un modelo aplicando técnicas de colección de conocimiento que sirve para explicar el funcionamiento y razonamiento de los controladores. Este modelo es implementado en un semáforo que controla el estado del mismo, decidiendo por su propia cuenta cuando mostrar la luz verde según el estado del tráfico vehicular.

En [67] se desarrolla un modelo predictivo determinista para controlar de manera compartida y adaptativa el estado de un semáforo en ITS. El modelo muestra una mejora significativa para los ITS.

Los algoritmos usados en Modelos de control vehicular en otras aplicaciones se los puede visualizar junto a los algoritmos usados en Esquemas, en la Figura 18.

*III-C19. Esquemas de control vehicular en otras aplicaciones:* En los estudios revisados en la literatura se encontró con un solo estudio que presenta un esquema de control vehicular que se centra en otras aplicaciones dentro de ITS.

TABLA X  
ESQUEMAS DE CONTROL VEHICULAR DE USO EN OTRAS APLICACIONES

Etq	Esquema	Categoría	Referencias
STI-E5	EMVCS	Señales de Tránsito Inteligentes	[71]

La herramienta EMVCS (STI-E5) se ha usado una sola vez en [71] donde se desarrolla un esquema que se centra en vehículos de emergencia con el fin de minimizar el impacto del tráfico de vehículos que no son de emergencia y garantizar el paso rápido de los EMV con un costo informático muy bajo. La disminución del tiempo en espera se ve reflejada como efectivo ante otro esquema sin preferencias.

*III-C20. Algoritmos usados en Modelos y Esquemas de control vehicular en otras aplicaciones:* También, dentro de cada Modelo y Esquema de control vehicular se han usado varios algoritmos que sirvieron de apoyo para la gestión y el control del mismo. En la Figura 18 los únicos algoritmos que se han utilizado son: i) Algoritmo Propio (AP) en [67], [68], [70] y [71] que implementan algoritmos desarrollados por cada investigador en cada modelo y esquema de control vehicular propuesto. ii) Q-Learning en [66] que implementa este algoritmo para que un agente robótico pueda decidir de la mejor manera que acción tomar ante un estado específico. iii) Genetic algorithm (GA) en [69] que implementa este algoritmo para resolver un modelo de optimización del tiempo de espera real de un vehículo.

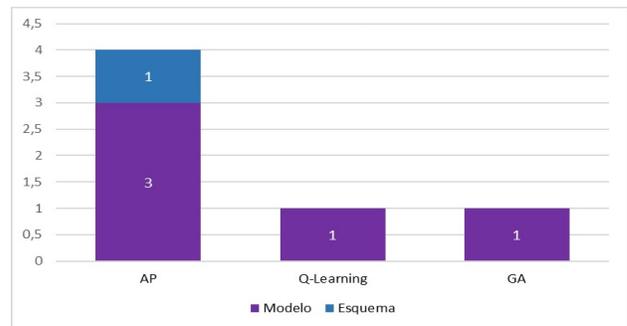


Figura 18. Recurrencia del uso de algoritmos de Modelos y Esquemas de control vehicular en Otras Aplicaciones

*III-C21. Métricas:* En la revisión de la literatura se encontraron algunas métricas con las que se mide la efectividad, rendimiento y eficiencia de cada algoritmo utilizado en cada herramienta de control vehicular. Cada algoritmo hace uso de diferentes métricas o medidas de rendimiento. A continuación se describen los más relevantes de cada estudio y se puede visualizar su recurrencia en la Figura 19.

#### Medidas matemáticas utilizadas:

- Precision (PR): Mide la calidad del modelo en tareas de clasificación, es la sumatoria de resultados positivos co-

rectos dividido por la sumatoria de resultados positivos que predijo el clasificador.

- Accuracy (AC): Mide el porcentaje de éxito que devuelve el algoritmo, se calcula como la sumatoria de predicciones exitosas dividido para la sumatoria total de datos.
- Sensitivity (TPR): La tasa de verdaderos positivos se expresa como sensibilidad y proporciona los resultados verdaderamente positivos de tráfico vehicular entre los resultados positivos detectados.
- Specificity (TNR): La tasa de verdaderos negativos se expresa como especificidad y proporciona los resultados verdaderamente negativos de tráfico vehicular entre los resultados negativos detectados.
- Fall-out (FPR): La tasa de falsos positivos se expresa como caída y proporciona los resultados negativos de tráfico vehicular que la prueba detecta como positivos.
- Miss-Rate (FNR): La tasa de falsos negativos se expresa como tasa de errores y proporciona el porcentaje erróneo restante del Accuracy.
- F-Measure (F1): Es un valor único que contiene la precisión y la recuperación. Se emplea para clasificar y recuperar la información de todos los vehículos que estén conectados a la red.
- Likelihood Positive Ratio (LR+): Es la sumatoria de la tasa de verdaderos positivos dividido para la sumatoria de la tasa de falsos positivos de tráfico vehicular.
- Likelihood Negative Ratio (LR-): Es la sumatoria de la tasa de verdaderos negativos dividido para la sumatoria de la tasa de falsos negativos de tráfico vehicular.
- Negative Predictive Value (NPV): Mide la calidad del modelo en tareas de clasificación, es la sumatoria de resultados verdaderos negativos dividido por la sumatoria de resultados negativos que predijo el clasificador.

#### Otras medidas utilizadas:

- Package Delivery Rate (PDR): Es el porcentaje de paquetes recibidos y enviados. Se calcula como la sumatoria de paquetes decodificados con éxito dividido por la sumatoria de paquetes decodificados con éxito más la sumatoria de paquetes erróneos.
- Execution Time (ET): Es el tiempo que se demora el algoritmo en iniciar hasta finalizar la tarea designada.
- Wait time (WT): Es el tiempo que se demora un vehículo en permanecer en un carril hasta continuar con su trayecto.
- Channel Busy Rate (CBR): Es la estimación de tiempo que el canal se encuentra ocupado con un paquete. Se calcula como el porcentaje de duración en el canal ocupado durante el intervalo de medición.
- Packet Delay Time (PDT): Es el tiempo perdido en el que un paquete es retrasado por algún problema en específico, comúnmente se produce por la baja señal.
- Travel Time Reduction (TTR): Es el porcentaje de tiempo ahorrado de un vehículo durante su viaje.
- Average Performance (AR): Es el porcentaje de rendimiento que tiene el algoritmo comparándose contra otros.

miento que tiene el algoritmo comparándose contra otros.

- Data Suppression (DS): Es la supresión de información que se aplica a un conjunto de datos, comúnmente se aplica a información innecesaria, opcional, duplicada o errónea.
- Lost Time Reduction (LTR): Es el porcentaje de tiempo perdido que se redujo, mejorando así el tiempo.
- Distance Increase (DI): Es el porcentaje de distancia que se aumenta por el tráfico vehicular.

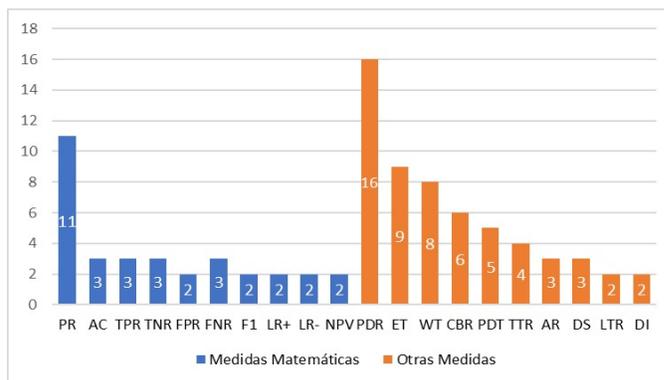


Figura 19. Recurrencia del uso de todas las métricas

III-C22. Entornos de Simulación: Todas las herramientas fueron probadas en varios programas de simulación, entre ellos están SUMO, OMNeT, Veins, NS2 y otros.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

SMP1: ¿Existe una taxonomía para las soluciones al tráfico vehicular?

La taxonomía permite clasificar de manera ordenada las soluciones al tráfico vehicular en ciudades inteligentes que están implementadas en aplicaciones tecnológicas para ITS. En la Figura 1 se puede visualizar que todo parte de los Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS). Dentro de los ITS se encuentran 2 aplicaciones tecnológicas que son: Redes de comunicación y Otras aplicaciones. i) Las Redes de comunicación se categorizan en redes vehiculares y otras redes informáticas. ii) Otras aplicaciones se categorizan en señales de tránsito inteligentes, vehículos inteligentes y otros. También se cuenta con herramientas categorizadas según la aplicación tecnológica que se haya utilizado para controlar el tráfico vehicular. Por último, tenemos los algoritmos que son implementados en cada herramienta propuesta por el investigador. Esta taxonomía está estructurada de manera que se tenga facilidad al momento de investigar sobre las soluciones al tráfico vehicular en ciudades inteligentes.

SMP2: ¿Cuál es la distribución de los estudios relacionados con revistas y conferencias en los últimos cinco años?

Los estudios revisados se distribuyen en revistas y conferencias (ver Figura 20) de la siguiente manera: en el año 2018

se identificaron 5 estudios en revistas y 4 en conferencias, en el año 2019 se identificaron 10 estudios en revistas y 2 en conferencias, en el año 2020 se identificaron 12 estudios en revistas y 4 en conferencias, en el año 2021 se identificaron 8 estudios en revistas y 4 en conferencias, y en el año 2022 se identificaron 8 estudios en revistas y 3 en conferencias. Cabe recalcar que en todos los años han habido gran cantidad de estudios.

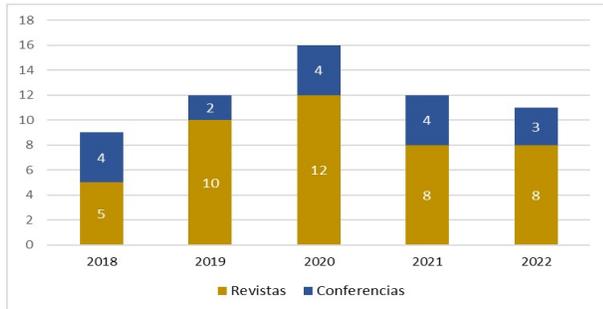


Figura 20. Distribución de los estudios en los últimos 5 años

*SLRP1: ¿Cuáles son las aplicaciones tecnológicas usadas dentro de los sistemas inteligentes de transporte?*

En los estudios revisados en la literatura se encuentran 2 aplicaciones tecnológicas (ver Figura 2). i) Las Redes de comunicación se dividen en Redes VANET y Otras Redes (ver Figura 5). Dentro de Otras Redes se encuentran Redes Vehiculares, Redes Móviles, Redes definidas por Software y Redes Distribuidas (ver Figura 6). ii) Otras aplicaciones se divide en Señales de Tránsito Inteligentes, Vehículos Inteligentes y Otros (ver Figura 14).

*SLRP2: ¿Qué sistemas de control se destacan como soluciones al tráfico vehicular?*

En Redes de comunicación existen varios sistemas de control vehicular (ver Tabla IV), así mismo se puede visualizar la frecuencia de uso de cada sistema en la Figura 7. Los sistemas que se destacan son:

- VCC (RV-S1): Esta herramienta se ha usado 6 veces para almacenar todos datos, en [11], [9], [16], [14], [17] y [18].
- MEC (RV-S3): Esta herramienta se ha usado 5 veces y se basa en el borde de una red móvil, en [11], [19], [15], [20] y [16].
- Fog Computing (RV-S4): Esta herramienta se ha usado 4 veces para complementar la herramienta MEC (RV-S3), en [11], [20], [16] y [21].

En Otras aplicaciones existen varios sistemas de control vehicular (ver Tabla VIII), su frecuencia de uso es única y se la puede visualizar en la Figura 15.

*SLRP3: ¿Qué mecanismos de control se destacan como soluciones al tráfico vehicular?*

En Redes de comunicación existen varios mecanismos de control vehicular (ver Tabla V), así mismo se puede visualizar la frecuencia de uso de cada mecanismo en la Figura 9. Los mecanismos que se destacan son:

- DCC (RV-M5): Esta herramienta se ha utilizado 4 veces para garantizar la comunicación confiable de los vehículos, en [34], [37], [35] y [36].
- DisTraC (RV-M2): Se ha utilizado para disminuir el tiempo de viaje de los vehículos, en [31].
- CIAC (RV-M3): Se ha utilizado para gestionar el tráfico vial mediante una infraestructura de red heterogénea, en [32].

En Otras aplicaciones no se ha encontrado ningún mecanismo de control vehicular según los estudios revisados.

*SLRP4: ¿Qué modelos de control se destacan como soluciones al tráfico vehicular?*

En Redes de comunicación existen varios modelos de control vehicular (ver Tabla VI), así mismo se puede visualizar la frecuencia de uso de cada modelo en la Figura 11. Los modelos que se destacan aparte de VCC (RV-MO3) encontrados también en los sistemas de control vehicular son:

- SDVN (OR-MO4): Se ha usado para reducir la demora de la comunicación mediante controladores ubicados en lugares estratégicos, en [41] y [43].
- SeDaTiVe (OR-MO13): Se ha usado para encontrar rutas ideales y gestionar el tráfico de red por donde la información será emitida, en [43].

En Otras aplicaciones existen varios modelos de control vehicular (ver Tabla IX), así mismo se puede visualizar la frecuencia de uso de cada modelo en la Figura 17. El modelo que se destaca es:

- RL (STI-MO16): Esta herramienta se ha usado para controlar las fases de un semáforo, en [66] y [67].

*SLRP5: ¿Qué esquemas de control se destacan como soluciones al tráfico vehicular?*

En Redes de comunicación existen varios esquemas de control vehicular (ver Tabla VII), así mismo se puede visualizar la frecuencia de uso de cada esquema en la Figura 13. El esquema que se destaca es RSU (RV-E2) que se ha utilizado para extraer la información necesaria sobre el tráfico vehicular, en [52] y [53].

En Otras aplicaciones solo se ha encontrado un esquema de control vehicular (ver Tabla X), este esquema es EMVCS (STI-E5) que se ha usado para reducir el tiempo que debe esperar un vehículo EMV en la carretera, en [71].

*SLRP6: ¿Qué algoritmos se destacan en cada herramienta propuesta?*

En todas las herramientas de control vehicular se destaca el uso de algoritmos propios (AP) que se utilizó 38 veces, pero también se han encontrado otros algoritmos que destacan entre otros. Las frecuencias de uso de estos algoritmos se pueden visualizar en las Figuras 8, 10, 12, 16 y 18. Los otros algoritmos destacados son:

- En sistemas de control vehicular se destaca el algoritmo ACO que se utilizó 3 veces, en [11], [22] y [34], el algoritmo Q-Learning utilizado 3 veces, en [11], [60] y [62], y el algoritmo SVM utilizado 2 veces en [19] y [27].
- En mecanismos de control vehicular se destaca el algoritmo SGTA que se utilizó 1 vez, en [30].
- En modelos de control vehicular se destaca el algoritmo Dijkstra que se utilizó 1 vez, en [41] y el algoritmo GA que su recurrencia también es única, en [69].
- En esquemas de control vehicular solo se destacan algoritmos propios (AP) ya que son de frecuencia única y se utilizó en [52], [54], [55], [71] y [53].

*SLRP7: ¿Qué medidas de rendimiento se utilizan para los algoritmos encontrados?*

En la Tabla XI, en la primera sección se pueden visualizar los estudios que han utilizado sistemas de control vehicular, el tipo de aplicación tecnológica correspondiente, el algoritmo que fue implementado en el sistema y los resultados más relevantes de las métricas en caso de que el estudio haya utilizado más de un algoritmo. En la segunda sección se pueden visualizar los estudios que han utilizado mecanismos de control vehicular, el tipo de aplicación tecnológica, el algoritmo implementado en el mecanismo y los resultados de las métricas más relevantes. En la tercera sección se pueden visualizar los estudios que han utilizado modelos de control vehicular, el tipo de aplicación tecnológica, el algoritmo implementado en el modelo y los resultados de las métricas más relevantes. En la cuarta sección se pueden visualizar los estudios que han utilizado esquemas de control vehicular, el tipo de aplicación tecnológica, el algoritmo implementado en el esquema y los resultados de las métricas más relevantes.

## V. CONCLUSIONES

En este documento, se ha realizado un estado del arte utilizando Mapeo Sistemático (SM) sobre las soluciones al tráfico vehicular en ciudades inteligentes. Los pasos para aplicar un SM atribuyen al lector 3 fases para facilitar la

examinación de los intereses de la investigación, con el fin de organizar la selección de literatura para una revisión mas profunda y detallada. Estas fases son: i) Fase 1, definición de la cadena de búsqueda y de los términos de inclusión y exclusión. ii) Fase 2, plantear preguntas de investigación para SM y SLR, y definir estrategias de búsqueda para ser aplicadas en repositorios. iii) Fase 3, extracción y síntesis de información. La obtención de los estudios revisados se da gracias a que se seleccionaron repositorios que disponían de numerosos artículos sobre las soluciones al tráfico vehicular entre los años 2018 a 2022.

Las herramientas de control vehicular utilizadas con mayor relevancia son: sistemas que implementan algoritmos desarrollados por el propio investigador y que son usados en señales de tránsito inteligentes; mecanismos que también implementan algoritmos propios y que son usados en redes definidas por software; modelos que también implementan algoritmos propios y también son usados en señales de tránsito inteligentes; esquemas que también implementan algoritmos propios y son usados en redes móviles. Todas estas herramientas también son usadas en redes VANET como aplicaciones tecnológicas para ITS y son utilizadas como soluciones para controlar el tráfico vehicular.

Las dificultades al momento de implementar las herramientas de control vehicular son el poco conocimiento de algunos algoritmos, ya que la mayoría de ellos son planteados por los investigadores y se necesita un amplio conocimiento sobre el tema o investigar a profundidad sobre el mismo. Para el correcto funcionamiento de todas las herramientas se han utilizado diferentes partes prácticas y teóricas de otros algoritmos.

Dentro de los 60 estudios revisados en la literatura se encontraron algunas métricas con las que los investigadores miden la efectividad y el rendimiento de los algoritmos propuestos. La métrica de mayor uso fue: Package Delivery Rate (PDR), se seleccionaron estudios que hayan usado esta métrica especificando el PDR máximo, mínimo y el promedio de todos los datos identificados. Así podemos observar que en Sistemas el PDR es: máximo = 95 %, mínimo = 56 %, promedio = 80.2 %; Mecanismos el PDR es: máximo = 85 %, mínimo = 30 %, promedio = 66.8 %; Modelos el PDR es: máximo = 96 %, mínimo = 70 %, promedio = 87 %; Esquemas el PDR se usa una sola vez = 95 %. Se evidencia que los esquemas cuentan con un mejor promedio pero solo porque tiene un solo estudio que haya usado esta métrica, el siguiente con mejor promedio son los modelos con un 87 %.

De esta forma podemos concluir que cualquier herramienta sirve como una solución para controlar el tráfico vehicular ya que los sistemas son los que se usan con más frecuencias, los modelos tienen el mejor promedio de efectividad y rendimiento, los esquemas con un promedio también alto. Siendo los mecanismos los más bajos en promedio.

TABLA XI  
RESULTADOS DE LAS MÉTRICAS DE TODOS LOS ALGORITMOS

Ref	Aplicación	Algoritmo	Resultado	Entorno de Simulación
<b>Sección 1: Sistemas</b>				
[15]	Redes VANET	AP	PDR=70 %; DS=40 %; PR=95 %; DA-RD=80 %	SUMO, OMNeT, Veins
[19]	Redes VANET	J48	PR=0.99; TPR=0.95; TNR=1; F1=0.97	
[22]	Redes VANET	ACO; Wolfe	OA-Frank- ACO: ET=2.99 ms	
[9]	Redes VANET	AP	WT=0.5 s	SUMO, OMNeT
[21]	Redes VANET	AP	TTR=19 %; SI=39 %; DI=13 %; LTR=26 %	SUMO, OMNeT, Veins
[26]	Redes VANET	AP	PDR=90 %; PCR=2 %	OMNeT, SUMO
[14]	Redes VANET	AP	TTR=65 %; DI=10.50 %; PDR=56 %	OMNeT, SUMO
[24]	Redes VANET	OA-IF	DS=60 %	
[25]	Redes VANET	AP	PDR=93.2 %; PDT=3 s; ET=180 s	NDN
[20]	Redes VANET	FL	DSA=30 %	
[18]	Redes VANET	AP		SUMO, NS2
[16]	Otras Redes (RDS)	OA-MLR; OA-K-Means; OA-RF	OA-MLR: E=74.84 %; F=80 %; PDR=77 %; LTR=15 %	SUMO
[27]	Otras Redes (RV)	OA-ANN; SVM	OA-ANN: TPR=75.4 %; TNR=96.8 %; AC=94 %; FNR=6 %; PR=78.4 %; NPV=96.3 %; FPR=0.031; LR+=24.323; LR-=0.062	
[28]	Otras Redes (RV)	AP	PDR=95 %	NS3
[29]	Otras Redes (RV)	AP	PR=73 %	
[56]	Vehículos Inteligentes	Dijkstra	WT=108.24 s	Matlab
[57]	Vehículos Inteligentes	AP	PDT=40 s	
[58]	Vehículos Inteligentes	AP	ET=180 s	
[59]	Señales de Tránsito Inteligentes	AP	WT=52 s	SUMO
[60]	Señales de Tránsito Inteligentes	Q-Learning	LTR=22.8 %; ET=0.0003 s; WT=27 s	SUMO
[62]	Señales de Tránsito Inteligentes	Q-Learning	PR=100 %; RC=92.67 %	SUMO
[61]	Señales de Tránsito Inteligentes	AP	PR=95 %	
[63]	Señales de Tránsito Inteligentes	AP	ET=40 s	VISSIM
[64]	Otros	OA-Mamdani	PR=94.42 %	
[65]	Otros	SVM	ET=1 s	
<b>Sección 2: Mecanismos</b>				
[30]	Redes VANET	OA-BLS; ElGamal	OA- OA-BLS: ET=4.78 ms	
[31]	Redes VANET	AP	TTR=26 %	OMNeT
[32]	Redes VANET	OA-SGTA	PRA=80 %	SUMO, OMNeT, Veins
[33]	Redes VANET	AP	PDR=80 %; PDT=5.5 s	SUMO, NS2
[34]	Redes VANET	AP	CBR=14 %; PDR=30 %; IRT=0.4 s	SUMO, OMNeT, Veins, PLEXE
[35]	Redes VANET	AP	CBR=94 %; PDR=64 %	SUMO
[38]	Redes VANET	Q-Learning	PDR=75 %; RO=52 %; PDT=0.3 s	NS2
[37]	Otras Redes (RV)	AP	CBR=49 %	OMNeT, SUMO, Veins
[39]	Otras Redes (RM)	FL	AC=85 %; FNR=15 %	
[36]	Otras Redes (RD)	AP	PDR=85 %	OMNeT
<b>Sección 3: Modelos</b>				
[40]	Redes VANET	AP	AT=60 %	
[44]	Redes VANET	AP	WT=370 s	Matlab
[45]	Redes VANET	AP	ET=500 s	Veins
[42]	Redes VANET	AP		
[46]	Redes VANET	OA-BA	PDR=96 %; C=95 %	
[47]	Redes VANET	AP	PL=35 %; PCR=37.17 %; CBR=30 %	OMNeT, SUMO, Veins
[41]	Otras Redes (RDS)	Dijkstra	PDR=70 %; PDT=2 s	SUMO
[43]	Otras Redes (RDS)	AP	PDR=95 %	SUMO, NS2
[48]	Otras Redes (RV)	AP	AR=87 %	
[50]	Otras Redes (RV)	AP		
[49]	Otras Redes (RV)	AP		
[51]	Otras Redes (RD)	AP	CBR=60 %	OMNeT
[66]	Señales de Tránsito Inteligentes	Q-Learning	PR=79.6 %	SUMO
[67]	Señales de Tránsito Inteligentes	AP	WT=110 s	SUMO
[68]	Vehículos Inteligentes	AP		
[69]	Vehículos Inteligentes	OA-AG	WT=272.3 s	
[70]	Otros	AP	F1=3.86 %	
<b>Sección 4: Esquemas</b>				
[52]	Redes VANET	AP	PDR=95 %	SUMO
[54]	Otras Redes (RM)	AP	AR=86 %	OPNET
[55]	Otras Redes (RM)	AP	LCI=88.28 %	Matlab
[53]	Otras Redes (RV)	AP	PTT=0.9 s	Python
[71]	Señales de Tránsito Inteligentes	AP	WT=25.05 s	SUMO

## REFERENCIAS

- [1] M. M. Motta Ramirez, "Ciudades inteligentes al servicio del ambiente," Dec. 2019. Accepted: 2020-03-11T15:59:26Z Publisher: Universidad Militar Nueva Granada.
- [2] TomTom, "Traffic congestion ranking | TomTom Traffic Index."
- [3] A. Bull, "Congestión de tránsito: el problema y cómo enfrentarlo," Oct. 2003. Accepted: 2014-03-20T01:30:55Z Publisher: CEPAL.
- [4] J. C. Bustamante Atehortúa, J. E. Chaparro Machete, A. M. Consuegra Laino, and A. Córdoba Borja, "Smart cities 5G : una implementación de la MTC para resolver el problema de tráfico en Bogotá," *instname:Universidad de los Andes*, 2018. Accepted: 2020-06-10T16:08:45Z Publisher: Universidad de los Andes.
- [5] L. Cárdenas González and C. Soto Lozano, "Modelación de un sistema inteligente de tráfico vehicular por medio de una simulación basada en agentes," Dec. 2020. Accepted: 2021-02-19T18:34:35Z Publisher: Pontificia Universidad Javeriana.
- [6] L. Ordóñez, "El desarrollo tecnológico en la historia," *Areté*, vol. 19, no. 2, pp. 187–210, 2007. Publisher: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [7] OPS, "Hoja informativa: La velocidad y los siniestros viales - OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud."
- [8] UIT, "Ciudades inteligentes y sostenibles," 2021.
- [9] N. Gaouar and M. Lehsaini, "A cloud computing based intelligent traffic control system for vehicular networks," in *Proceedings of the 4th International Conference on Networking, Information Systems & Security, NISS2021*, (New York, NY, USA), pp. 1–5, Association for Computing Machinery, Nov. 2021.
- [10] J. Guerrero-Ibáñez, S. Zeadally, and J. Contreras-Castillo, "Sensor Technologies for Intelligent Transportation Systems," *Sensors*, vol. 18, p. 1212, Apr. 2018. Number: 4 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [11] K. Jurczenia and J. Rak, "A Survey of Vehicular Network Systems for Road Traffic Management," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 42365–42385, 2022. Conference Name: IEEE Access.
- [12] D. Carrizo and J. Rojas, "Metodologías, técnicas y herramientas en ingeniería de requisitos: un mapeo sistemático," *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 26, no. 3, pp. 473–485, 2018.
- [13] L. I. González-Pérez, M. S. Ramírez-Montoya, and F. J. García-Peñalvo, "Innovación educativa en estudios sobre el desarrollo y uso de la tecnología: Un mapeo sistemático," Nov. 2019. Accepted: 2019-11-21T10:29:24Z ISBN: 9788417667788 Publisher: Octaedro.
- [14] D. L. Guidoni, G. Maia, F. S. H. Souza, L. A. Villas, and A. A. F. Loureiro, "Vehicular Traffic Management Based on Traffic Engineering for Vehicular Ad Hoc Networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 45167–45183, 2020. Conference Name: IEEE Access.
- [15] T. S. Gomides, R. E. De Grande, R. I. Meneguette, F. S. H. de Souza, and D. L. Guidoni, "Predictive Congestion Control based on Collaborative Information Sharing for Vehicular Ad hoc Networks," *Computer Networks*, vol. 211, p. 108955, July 2022.
- [16] S. Maaroufi and S. Pierre, "BCOOL: A Novel Blockchain Congestion Control Architecture Using Dynamic Service Function Chaining and Machine Learning for Next Generation Vehicular Networks," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 53096–53122, 2021. Conference Name: IEEE Access.
- [17] S. Mohamed Hatim, S. J. Elias, M. Y. Darus, S. Abdullah, J. Jasmis, R. B. Ahmad, and A. Y. K. Wong, "Congestion Control In Vehicular Adhoc Network: A Survey,"
- [18] Y. Agarwal, K. Jain, and O. Karabasoglu, "Smart vehicle monitoring and assistance using cloud computing in vehicular Ad Hoc networks," *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 7, pp. 60–73, Mar. 2018.
- [19] Sahil and S. K. Sood, "Smart vehicular traffic management: An edge cloud centric IoT based framework," *Internet of Things*, vol. 14, p. 100140, June 2021.
- [20] K. Bylykbashi, E. Qafzezi, M. Ikeda, K. Matsuo, and L. Barolli, "Fuzzy-based Driver Monitoring System (FDMS): Implementation of two intelligent FDMSs and a testbed for safe driving in VANETs," *Future Generation Computer Systems*, vol. 105, pp. 665–674, Apr. 2020.
- [21] M. Lourenço, T. S. Gomides, F. S. H. de Souza, R. I. Meneguette, and D. L. Guidoni, "A Traffic Management Service Based on V2I Communication for Vehicular Ad-hoc Networks," in *Proceedings of the 10th Latin America Networking Conference, LANC '18*, (New York, NY, USA), pp. 25–31, Association for Computing Machinery, Oct. 2018.
- [22] W.-L. Liu, Y.-J. Gong, W.-N. Chen, and J. Zhang, "EvoTSC: An evolutionary computation-based traffic signal controller for large-scale urban transportation networks," *Applied Soft Computing*, vol. 97, p. 106640, Dec. 2020.
- [23] A. T. Akabane, R. Immich, L. F. Bittencourt, E. R. M. Madeira, and L. A. Villas, "Towards a distributed and infrastructure-less vehicular traffic management system," *Computer Communications*, vol. 151, pp. 306–319, Feb. 2020.
- [24] A. Rizwan, D. A. Karras, M. Dighriri, J. Kumar, E. Dixit, A. Jalali, and A. Mahmoud, "Simulation of IoT-based Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs) for Smart Traffic Management Systems," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, p. e3378558, May 2022. Publisher: Hindawi.
- [25] M. Al-qutwani and X. Wang, "Smart Traffic Lights over Vehicular Named Data Networking," *Information*, vol. 10, p. 83, Mar. 2019. Number: 3 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [26] B.-M. Cho, M.-S. Jang, and K.-J. Park, "Channel-Aware Congestion Control in Vehicular Cyber-Physical Systems," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 73193–73203, 2020. Conference Name: IEEE Access.
- [27] M. Saleem, S. Abbas, T. M. Ghazal, M. Adnan Khan, N. Sahawneh, and M. Ahmad, "Smart cities: Fusion-based intelligent traffic congestion control system for vehicular networks using machine learning techniques," *Egyptian Informatics Journal*, vol. 23, pp. 417–426, Sept. 2022.
- [28] I. Rubin, A. Baiocchi, Y. Sunyoto, and I. Turcanu, "Traffic management and networking for autonomous vehicular highway systems," *Ad Hoc Networks*, vol. 83, pp. 125–148, Feb. 2019.
- [29] H. Zheng, W. Chang, and J. Wu, "Traffic flow monitoring systems in smart cities: Coverage and distinguishability among vehicles," *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 127, pp. 224–237, May 2019.
- [30] X. Zhang and D. Wang, "Adaptive Traffic Signal Control Mechanism for Intelligent Transportation Based on a Consortium Blockchain," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 97281–97295, 2019. Conference Name: IEEE Access.
- [31] R. S. de Sousa, A. Boukerche, and A. A. F. Loureiro, "A distributed and low-overhead traffic congestion control protocol for vehicular ad hoc networks," *Computer Communications*, vol. 159, pp. 258–270, June 2020.
- [32] I. Ahmad, R. M. Noor, M. R. Zaba, M. A. Qureshi, M. Imran, and M. Shoaib, "A Cooperative Heterogeneous Vehicular Clustering Mechanism for Road Traffic Management," *International Journal of Parallel Programming*, vol. 48, pp. 870–889, Oct. 2020.
- [33] R. Regin and T. Menakadevi, "Dynamic Clustering Mechanism to Avoid Congestion Control in Vehicular Ad Hoc Networks Based on Node Density," *Wireless Personal Communications*, vol. 107, pp. 1911–1931, Aug. 2019.
- [34] Z. Liang, F. Sedighi, and A. Balador, "Evaluation and optimization of Decentralized Congestion Control Algorithms for Vehicular Networks," in *2019 IEEE/ACM 23rd International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)*, pp. 1–8, Oct. 2019. ISSN: 1550-6525.
- [35] M. Deeksha, A. Patil, M. Kulkarni, N. S. V. Shet, and P. Muthuchidambaranathan, "Multistate Active Combined Power and Message/Data Rate Adaptive Decentralized Congestion Control Mechanisms for Vehicular Ad Hoc Networks," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2161, p. 012018, Jan. 2022. Publisher: IOP Publishing.
- [36] E. Egea-Lopez, P. Pavon-Mariño, and J. Santa, "Optimal Joint Power and Rate Adaptation for Awareness and Congestion Control in Vehicular Networks," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, pp. 25033–25046, Dec. 2022. Conference Name: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.
- [37] I. Turcanu, A. Baiocchi, N. Lyamin, and A. Vinel, "An Age-Of-Information Perspective on Decentralized Congestion Control in Vehicular Networks," in *2021 19th Mediterranean Communication and Computer Networking Conference (MedComNet)*, pp. 1–8, June 2021.
- [38] M. U. Khan, M. Hosseinzadeh, and A. Mosavi, "An Intersection-Based Routing Scheme Using Q-Learning in Vehicular Ad Hoc Networks for Traffic Management in the Intelligent Transportation System," *Mathematics*, vol. 10, p. 3731, Jan. 2022. Number: 20 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [39] N. Zhou, "The Future Integrated Traffic Management System to Optimize the Automobile Traffic," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1972, p. 012097, July 2021. Publisher: IOP Publishing.
- [40] P. Sun and N. Samaan, "A Novel VANET-Assisted Traffic Control for Supporting Vehicular Cloud Computing," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, pp. 6726–6736, Nov. 2021.

- Conference Name: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.
- [41] N. Aljeri and A. Boukerche, "An Adaptive Traffic-Flow based Controller Deployment Scheme for Software-Defined Vehicular Networks," in *Proceedings of the 23rd International ACM Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, MSWiM '20*, (New York, NY, USA), pp. 191–198, Association for Computing Machinery, Nov. 2020.
- [42] B. Othman, G. De Nunzio, D. Di Domenico, and C. Canudas-de Wit, "Ecological traffic management: A review of the modeling and control strategies for improving environmental sustainability of road transportation," *Annual Reviews in Control*, vol. 48, pp. 292–311, Jan. 2019.
- [43] A. Jindal, G. S. Aujla, N. Kumar, R. Chaudhary, M. S. Obaidat, and I. You, "SeDaTiVe: SDN-Enabled Deep Learning Architecture for Network Traffic Control in Vehicular Cyber-Physical Systems," *IEEE Network*, vol. 32, pp. 66–73, Nov. 2018. Conference Name: IEEE Network.
- [44] M. Cao, Q. Shuai, and V. O. K. Li, "Navigation-Based Traffic Signal Control in Intelligent Transportation Systems," in *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–7, Dec. 2018. ISSN: 2576-6813.
- [45] T. Liu, A. A. Abouzeid, and A. A. Julius, "Traffic Flow Control in Vehicular Multi-Hop Networks with Data Caching," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 19, pp. 231–244, Jan. 2020. Conference Name: IEEE Transactions on Mobile Computing.
- [46] S. Kannan, G. Dhiman, Y. Natarajan, A. Sharma, S. N. Mohanty, M. Soni, U. Easwaran, H. Ghorbani, A. Asheralieva, and M. Gheisari, "Ubiquitous Vehicular Ad-Hoc Network Computing Using Deep Neural Network with IoT-Based Bat Agents for Traffic Management," *Electronics*, vol. 10, p. 785, Jan. 2021. Number: 7 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [47] H. Amer, H. Al-Kashoash, M. J. Khami, M. Mayfield, and L. Mihaylova, "Non-cooperative game based congestion control for data rate optimization in vehicular ad hoc networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 107, p. 102181, Oct. 2020.
- [48] S.-W. Chiou, "A traffic-responsive signal control to enhance road network resilience with hazmat transportation in multiple periods," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 175, pp. 105–118, July 2018.
- [49] A. Balador, E. Cinque, M. Pratesi, F. Valentini, C. Bai, A. A. Gómez, and M. Mohammadi, "Survey on decentralized congestion control methods for vehicular communication," *Vehicular Communications*, vol. 33, p. 100394, Jan. 2022.
- [50] C. Rosdahl, G. Nilsson, and G. Como, "On Distributed Optimal Control of Traffic Flows in Transportation Networks," in *2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, pp. 903–908, Aug. 2018.
- [51] J. Aznar-Poveda, E. Egea-Lopez, A.-J. Garcia-Sanchez, and P. Pavon-Mariá, "Time-to-Collision-Based Awareness and Congestion Control for Vehicular Communications," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 154192–154208, 2019. Conference Name: IEEE Access.
- [52] M. Khabbaz, E. Saad, and J. Kodsri, "A Novel Vehicular Traffic Control Scheme for Connectivity Improvement in VANETs," in *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–6, Dec. 2018. ISSN: 2576-6813.
- [53] University Putra Malaysia (U.P.M), Malaysia and A. Ghasempour, "Using Traffic Control Scheme In Intelligent Transportation System," *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, pp. 165–172, Sept. 2019.
- [54] W. Na, D. S. Lakew, J. Lee, and S. Cho, "Congestion control vs. link failure: TCP behavior in mmWave connected vehicular networks," *Future Generation Computer Systems*, vol. 101, pp. 1213–1222, Dec. 2019.
- [55] K. Yu, L. Lin, M. Alazab, L. Tan, and B. Gu, "Deep Learning-Based Traffic Safety Solution for a Mixture of Autonomous and Manual Vehicles in a 5G-Enabled Intelligent Transportation System," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, pp. 4337–4347, July 2021. Conference Name: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.
- [56] I. Draganjac, T. Petrović, D. Miklič, Z. Kovačić, and J. Oršulić, "Highly-scalable traffic management of autonomous industrial transportation systems," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 63, p. 101915, June 2020.
- [57] K. Hasebe, S. Sasaki, and K. Kato, "Fault Tolerance in the Traffic Management System of a Last-mile Transportation Service," pp. 552–557, Jan. 2023.
- [58] E. Ratnawati, "MRT as an Alternative Transportation Solution which is environmentally friendly and traffic jam free in Jakarta," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 819, p. 012040, July 2021. Publisher: IOP Publishing.
- [59] N. Kumar, S. S. Rahman, and N. Dhakad, "Fuzzy Inference Enabled Deep Reinforcement Learning-Based Traffic Light Control for Intelligent Transportation System," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, pp. 4919–4928, Aug. 2021. Conference Name: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.
- [60] Z. Ying, S. Cao, X. Liu, Z. Ma, J. Ma, and R. H. Deng, "PrivacySignal: Privacy-Preserving Traffic Signal Control for Intelligent Transportation System," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, pp. 16290–16303, Sept. 2022. Conference Name: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.
- [61] Y. Shao, C. R. Wang, A. Berres, J. Yoshioka, A. Cook, and H. Xu, "Computer Vision-Enabled Smart Traffic Monitoring for Sustainable Transportation Management," pp. 34–45, Aug. 2022. Publisher: American Society of Civil Engineers.
- [62] J. Hurtado-Gómez, J. D. Romo, R. Salazar-Cabrera, Pachón de la Cruz, and J. M. Madrid Molina, "Traffic Signal Control System Based on Intelligent Transportation System and Reinforcement Learning," *Electronics*, vol. 10, p. 2363, Jan. 2021. Number: 19 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [63] J. D. Trivedi, M. S. Devi, and D. H. Dave, "A Vision-Based Real-Time Adaptive Traffic Light Control System Using Vehicular Density Value and Statistical Block Matching Approach," *Transport and Telecommunication Journal*, vol. 22, pp. 87–97, Jan. 2021.
- [64] A. S. Sysoev and E. L. Khabibullina, "Functional model of expert traffic flow control system within high-speed transportation corridors," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1479, p. 012084, Mar. 2020. Publisher: IOP Publishing.
- [65] M. M. V. L., A. Balakrishna, N. K. S. R., and K. V., "Level-6 Automated IoT integrated with Artificial Intelligence Based Big Data-Driven Dynamic Vehicular Traffic Control System," *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, vol. 7, pp. e9–e9, Apr. 2020.
- [66] S. Wollenstein-Betech, C. Muise, C. G. Cassandras, I. C. Paschalidis, and Y. Khazaeni, "Explainability of Intelligent Transportation Systems using Knowledge Compilation: a Traffic Light Controller Case," in *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 1–6, Sept. 2020.
- [67] V. V. Myasnikov, A. A. Agafonov, and A. S. Yumaganov, "A deterministic predictive traffic signal control model in intelligent transportation and geoinformation systems," *Computer Optics*, vol. 45, pp. 917–925, Dec. 2021. ADS Bibcode: 2021CoOpt..45..917M.
- [68] K. Huang, C. Jiang, P. Li, A. Shan, J. Wan, W. Qin, K. Huang, C. Jiang, P. Li, A. Shan, J. Wan, and W. Qin, "A systematic framework for urban smart transportation towards traffic management and parking," *Electronic Research Archive*, vol. 30, no. 11, pp. 4191–4208, 2022. Cc\_license\_type: cc\_by Number: era-30-11-212 Primary\_atype: Electronic Research Archive Subject\_term: Research article Subject\_term\_id: Research article.
- [69] H. Ren, Y. Song, S. Li, and Z. Dong, "Two-Step Optimization of Urban Rail Transit Marshalling and Real-Time Station Control at a Comprehensive Transportation Hub," *Urban Rail Transit*, vol. 7, pp. 257–268, Dec. 2021.
- [70] N. M. Zafri, S. Afroj, M. A. Ali, M. M. U. Hasan, and M. H. Rahman, "Effectiveness of containment strategies and local cognition to control vehicular traffic volume in Dhaka, Bangladesh during COVID-19 pandemic: Use of Google Map based real-time traffic data," *PLOS ONE*, vol. 16, p. e0252228, May 2021. Publisher: Public Library of Science.
- [71] M. Cao, Q. Shuai, and V. O. Li, "Emergency Vehicle-Centered Traffic Signal Control in Intelligent Transportation Systems," in *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, pp. 4525–4531, Oct. 2019.