

Trabajo de Fin de Máster  
Máster en Sistemas Inteligentes  
julio, 2023

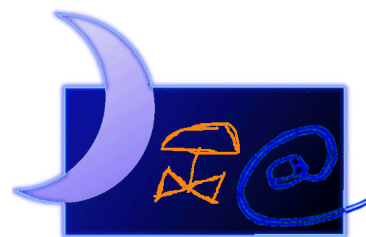
## Optimización de la movilidad a partir del manejo de datos de flujo de tráfico

Juan Manuel Otero Otero  
Tutora: Vivian Félix López Batista  
Cotutor: Juan Francisco de Paz Santana



**VNiVERSIDAD  
D SALAMANCA**

CAMPUS OF INTERNATIONAL EXCELLENCE



**Departamento de  
Informática y  
Automática**

Departamento de Informática y Automática  
Universidad de Salamanca

Revisado por:

Dra. Vivian Félix López Batista

Departamento de Informática y Automática  
Facultad de Ciencias — Universidad de Salamanca  
Plaza de la Merced S/N — 37008 — Salamanca  
vivian@usal.es

Dr. Juan Francisco de Paz Santana

Departamento de Informática y Automática  
Facultad de Ciencias — Universidad de Salamanca  
Plaza de la Merced S/N — 37008 — Salamanca  
fcofds@usal.es

Autor:

Juan Manuel Otero Otero

Departamento de Informática y Automática  
Facultad de Ciencias — Universidad de Salamanca  
Plaza de la Merced S/N — 37008 — Salamanca  
juanm.otero2@usal.es

Este documento puede ser libremente distribuido.

(c) 2006 Departamento de Informática y Automática - Universidad de Salamanca.

*A mis padres, por haber hecho todo lo posible para cumpliera mi sueño. Vuestra ayuda y apoyo incondicional ha sido fundamental para cumplir mi mayor deseo desde niño; estudiar y dedicarme a lo que siempre me gustó, la informática. Hoy, ha llegado ese momento, GRACIAS.*

*A Lydia, mi pareja, por haberme acompañado en todo este camino. No ha sido un recorrido fácil, pero juntos lo hemos conseguido. GRACIAS por tu fuerza y por tu valentía en los momentos más difíciles, y por tu guía cuando ya no sabía cómo continuar.*

## Resumen

La congestión de tráfico, agravada por el incremento en la densidad de población, vehículos motorizados y servicios de transporte compartidos, tienen un impacto significativo en la economía y calidad de vida de la población mundial. El fenómeno de la congestión es causado por diversos factores como el exceso de demanda de las vías, la señalización deficiente, etcétera. En España, el crecimiento de vehículos matriculados ha aumentado significativamente, afectando a la calidad del aire, generando contaminación acústica, y aumentando la congestión y siniestralidad vial. Esta realidad resalta la necesidad de nuevas estrategias urbanas y sistemas de control de tráfico más eficientes y sostenibles

En este contexto, este trabajo se enfoca en la optimización de la gestión semafórica en una intersección de la ciudad de Salamanca, mediante el uso de simuladores de tráfico y técnicas de optimización, con el objetivo de mejorar el flujo vehicular y reducir la congestión.

A través de un análisis exhaustivo de simuladores de tráfico y técnicas de optimización, el estudio logró su objetivo principal de obtener configuraciones óptimas de los tiempos de los semáforos. Se adoptó una meticulosa metodología para recopilar datos relevantes, modelar y ajustar una simulación, e implementar el algoritmo PSO como técnica de optimización. El resultado fue una distribución más equitativa del flujo vehicular, evidenciando la importancia de la simulación de tráfico y las técnicas de optimización para la eficiencia vial.

Los logros obtenidos tienen el potencial de contribuir a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, al proponer soluciones para un desarrollo urbano equitativo y sostenible. Como futuros pasos, se plantea la implementación de este trabajo en un entorno real utilizando tecnologías de visión artificial para la optimización en tiempo real de los semáforos. También se propone la exploración de otros simuladores de tráfico y técnicas de optimización basadas en inteligencia artificial, subrayando la necesidad de sistemas de control de tráfico más eficientes y sostenibles.

## Abstract

Traffic congestion, exacerbated by the increase in population density, motorized vehicles, and shared transportation services, has a significant impact on the global economy and quality of life. The phenomenon of congestion is caused by various factors such as the excess demand for roads, inadequate signaling, and so on. In Spain, the growth of registered vehicles has increased significantly, affecting air quality, generating noise pollution, and increasing traffic congestion and road accidents. This reality highlights the need for new urban strategies and more efficient and sustainable traffic control systems.

In this context, this work focuses on the optimization of traffic light management at an intersection in the city of Salamanca, through the use of traffic simulators and optimization techniques, with the aim of improving vehicular flow and reducing congestion.

Through a thorough analysis of traffic simulators and optimization techniques, the study achieved its primary goal of obtaining optimal settings for traffic light timings. A meticulous methodology was adopted to collect relevant data, model and adjust a simulation, and implement the PSO algorithm as an optimization technique. The result was a more equitable distribution of vehicular flow, demonstrating the importance of traffic simulation and optimization techniques for traffic efficiency.

The achievements obtained have the potential to contribute to the UN's Sustainable Development Goals, by proposing solutions for equitable and sustainable urban development. As future steps, the implementation of this work in a real environment using artificial vision technologies for real-time traffic light optimization is proposed. The exploration of other traffic simulators and artificial intelligence-based optimization techniques is also proposed, underlining the need for more efficient and sustainable traffic control systems.

# Índice

Índice de figuras	VI
Indice de tablas	VIII
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos	3
1.2. Impacto esperado – Objetivos de Desarrollo Sostenible	3
1.3. Estructura de la memoria	4
<b>2. Estado del arte</b>	<b>6</b>
2.1. Simuladores de tráfico	7
2.2. Estudio de los principales simuladores del mercado	8
2.2.1. Simulador VISSIM	8
2.2.2. Simulador AIMSUM	10
2.2.3. Simulador SUMO	10
2.2.4. Simulador PARAMICS	12
2.2.5. Simulador TRANSMODELER	12
2.3. Casos de uso de simuladores de tráfico	13
2.3.1. Quito (Ecuador) – Simulador SUMO	13
2.3.2. Lima (Perú) – Simulador VISSIM	14
2.3.3. Valencia (España) – Simulador SUMO	16
2.3.4. Málaga (España) – Simulador SUMO	17
2.3.5. Jinhua (China) – Simulador VISSIM	17
2.3.6. Kenitra (Marruecos) – Simulador SUMO	18
<b>3. Técnicas de optimización</b>	<b>20</b>
3.1. Algoritmo genético	20
3.2. Optimización por enjambre de partículas	22
3.3. Aprendizaje por refuerzo	22
3.4. Lógica difusa	24
3.5. Agentes Inteligentes	24
<b>4. Metodología</b>	<b>26</b>
4.1. Selección de la intersección y estudio de los agentes implicados	27
4.2. Creación y ajuste de modelo, con SUMO, OpenStreetMap y netedit	29
4.3. Creación de los <i>scripts</i> necesarios	30
<b>5. Caso de estudio</b>	<b>33</b>
5.1. Selección de la intersección y estudio de los agentes implicados	33

5.2. Creación y ajuste del modelo, con SUMO, OpenStreetMap y netedit .	34
<b>6. Resultados y discusión</b>	<b>40</b>
<b>7. Conclusiones</b>	<b>48</b>
<b>Referencias</b>	<b>49</b>

## Índice de figuras

1.	Evolución del Parque Nacional de Vehículos 2006-2020 [92]. . . . .	2
2.	Elemento de un sistema de semaforización inteligente mediante procesamiento de imágenes [18]. . . . .	7
3.	Simuladores de tráfico existentes en el mercado [7]. . . . .	9
4.	Simulación de una intersección realizada en VISSIM [24]. . . . .	9
5.	Simulación de una intersección realizada en AIMSUM [24]. . . . .	10
6.	Visualización mediante el simulador SUMO [52]. . . . .	11
7.	Etapas de SUMO y sus interacciones [49]. . . . .	12
8.	Visualización mediante el simulador PARAMICS [1]. . . . .	13
9.	Visualización mediante el simulador TRANSMODELER [45]. . . . .	14
10.	Colocación de sensores para la obtención de información en el simulador SUMO [58]. . . . .	14
11.	Puntos de conflicto en la rotonda de Plaza Bolognesi (Lima). . . . .	15
12.	Tipos de conflicto detectados. . . . .	16
13.	Modelo de propuesta geométrica en VISSIM. . . . .	16
14.	Representación del mapa de Málaga exportado al formato de SUMO. . . . .	17
15.	Diagrama esquemático del esquema de canalización de intersección optimizado. . . . .	18
16.	Diseño de la red de carreteras de Kenitra implementado en el estudio. . . . .	19
17.	Flujo de los algoritmos genéticos [57]. . . . .	21
18.	Estructura del algoritmo aprendizaje por refuerzo [107]. . . . .	23
19.	Proceso de aprendizaje por refuerzo para el problema de control de semáforos [10]. . . . .	23
20.	Diagrama de agente colaborativo [70]. . . . .	25
21.	Metodología empleada en la realización del proyecto. . . . .	27
22.	Agentes implicados en esta metodología. . . . .	29
23.	Flujo de trabajo con PSO + SUMO. . . . .	30
24.	Vista aérea de la intersección seleccionada. . . . .	33
25.	Selección de la intersección con OpenStreetMap. . . . .	34
26.	Diseño de los grupos semafóricos en netedit. . . . .	35
27.	Número de carril según el grupo semafórico. . . . .	37
28.	Configuración de las rutas en netedit. . . . .	38
29.	Resultado final de la simulación en SUMO. . . . .	39
30.	Ejecución del programa de optimización. . . . .	39
31.	Gráfica de dispersión. Tiempos de las fases de los semáforos. . . . .	41
32.	Valores de <i>performance_metric</i> en la ejecución 1. . . . .	43
33.	Valores de <i>performance_metric</i> en la ejecución 2. . . . .	43
34.	Valores de <i>performance_metric</i> en la ejecución 3. . . . .	44

35.	Valores de <i>performance_metric</i> en la ejecución 4. . . . .	44
36.	Valores de <i>performance_metric</i> en la ejecución 5. . . . .	45
37.	Valores de <i>performance_metric</i> en la ejecución 6. . . . .	45
38.	Valores de <i>performance_metric</i> en la ejecución 7. . . . .	46
39.	Valores de <i>performance_metric</i> en la ejecución 8. . . . .	46
40.	Valores de <i>performance_metric</i> en la ejecución 9. . . . .	47
41.	Valores de <i>performance_metric</i> en la ejecución 10. . . . .	47

## Indice de tablas

1. Semáforos y su división en grupos semafóricos. . . . . 35
2. Rutas de los vehículos en la intersección. . . . . 37
3. Tiempos óptimos obtenidos para los diferentes grupos semafóricos. . . 41

## 1. Introducción

La congestión del tráfico produce un gran impacto en la economía de un país y en la salud de sus habitantes [6]. Este fenómeno global resulta de la alta densidad de población, el crecimiento de la cantidad de vehículos motorizados y la proliferación de servicios de entrega y viajes compartidos [78]. En definitiva, la congestión se basa en la fricción entre los vehículos en tránsito. Hasta un cierto nivel, los vehículos pueden transitar a una velocidad libre, determinada por los límites de velocidad, la frecuencia de las intersecciones, etc. Sin embargo, a mayor volumen, cada vehículo adicional interrumpe el libre tránsito de los demás, produciendo el fenómeno de la congestión. Ésta prevalece si la introducción de un vehículo en el flujo aumenta el tiempo de circulación de los demás [89].

La congestión vehicular se produce por diferentes motivos, como el exceso de demanda de la vía, la señalización deficiente, los incidentes o las zonas congestionadas por horario laboral o escolar. Será necesario realizar un análisis de las principales causas en cada punto de estudio. Algunas de las causas más comunes son [3]:

- **Cuello de botella:** Sucede cuando el flujo de tráfico a unas horas punta determinadas excede la capacidad de la carretera. Por ejemplo, se dan cuellos de botella en aquellas carreteras donde confluyen más carriles de los que tiene la carretera de destino, y superando la demanda a la capacidad de la vía.
- **Infraestructuras o controladores deficientes:** Se produce la congestión cuando las infraestructuras, como semáforos, señales, número de carriles o sincronización de las intersecciones, no son adecuadas [99][27].
- **Variación del flujo de tráfico:** Ocurre cuando existen excesos en la demanda que superan la capacidad de la vía. Por ejemplo, sucede cuando en un momento determinado, como podría ser una “operación salida”, se da un incremento del número de vehículos en la vía que supera la capacidad de esta [27].
- **Incidentes/accidentes:** Este es el caso de los accidentes de tráfico o averías que pueden interrumpir el flujo del tráfico y reducir la capacidad normal de la carretera al bloquear algún carril de la circulación [79].
- **Obras:** Se refiere a actividades de construcción puntuales en una vía. Produce una reducción de la capacidad de la carretera al bloquear algún carril o incluso al realizar desvíos.
- **Clima:** Los cambios de las condiciones atmosféricas, junto con el mal estado de algunas carreteras produce alteraciones en el flujo de tráfico y en el comportamiento de los conductores.
- **Otros eventos especiales:** Incluyen actividades deportivas, conciertos u otros eventos sociales. Un pico repentino en la demanda de tráfico o algún otro corte puntual en el tráfico puede producir congestión.

## Optimización de la movilidad a partir del manejo de datos de flujo de tráfico

---

El volumen vehicular a nivel mundial se ha incrementado de forma acelerada, produciendo que en algunas ciudades la cantidad de vehículos en uno o más puntos de la vía exceda su capacidad [86]. Este crecimiento ha causado un incremento de la contaminación ambiental, acústica, visual y atmosférica [95][74]. Además, a nivel estratégico, el crecimiento vehicular, junto con una inadecuada planificación del tráfico de las ciudades, produce datos elevados de congestión y siniestralidad vial [26]. Este incremento se puede ver reflejado utilizando los datos de Parque Nacional de Vehículos de España. En la siguiente gráfica se muestra la evolución del Parque Nacional de Vehículos desde el 2006 hasta el 2020, con un incremento del 19,6 % de vehículos matriculados durante este periodo [Figura 1].

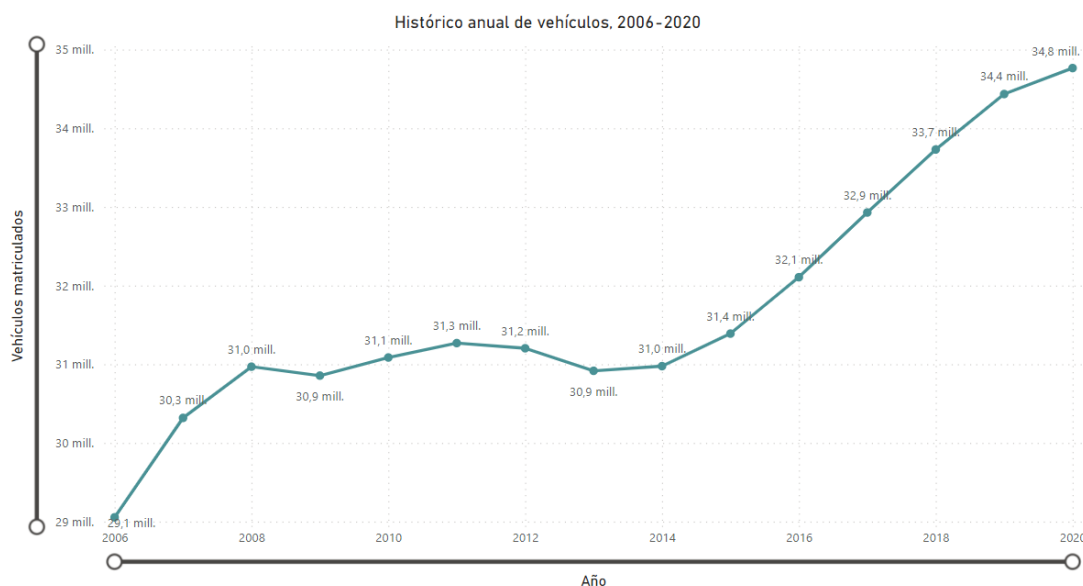


Figura 1: Evolución del Parque Nacional de Vehículos 2006-2020 [92].

Según los datos proporcionados por la Dirección General de Tráfico, en España, a 31 de diciembre de 2021, había 35.178.808 vehículos matriculados [93]. Esto se traduce en un volumen de 743,25 vehículos por cada 1000 habitantes [25]. En el caso de la provincia de Salamanca, en la misma fecha había matriculados 243.268 vehículos [93], lo que se traduce en un volumen de 745,15 vehículos por cada 1000 habitantes [25].

Este constante crecimiento vehicular en los núcleos urbanos, acompañado del crecimiento de la población mundial, ha generado la necesidad de pensar en nuevos diseños urbanos más eficientes y sostenibles [82]. Por este motivo, se requiere que las ciudades inviertan parte de su presupuesto en sistemas de control del flujo de tráfico, implementando sistemas como el control a tiempo real de los semáforos u otros sistemas que estén basados en análisis previos con *software* especializados, aunque no se sincronicen a tiempo real. En aquellas ciudades en las que no se dispone de suficiente presupuesto se sustituyen los sistemas de control citados anteriormente por la experiencia de los usuarios de la carretera [62].

Dentro de las soluciones, los simuladores de tráfico se postulan como una herramienta con alto potencial para estudiar el flujo vehicular, su optimización y el

análisis de las políticas municipales implementadas [31]. Los simuladores de tráfico ofrecen una gran variedad de opciones como el control de semáforos, control de aforo o control de zonas restringidas para ciertos vehículos [67].

## 1.1. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es realizar la optimización de la gestión semafórica de una intersección de la ciudad de Salamanca mediante el uso de una técnica de optimización, con el fin de mejorar la eficiencia del flujo vehicular y reducir la congestión de dicha intersección. Además, durante la elaboración de este proyecto se abarcarán los siguientes objetivos secundarios:

- Realizar una revisión exhaustiva de los simuladores de tráfico disponibles en el mercado, analizando sus características y capacidades investigando sus aplicaciones en diferentes casos de estudio. Posteriormente, se seleccionará el simulador más adecuado para el caso de estudio.
- Realizar un estudio detallado de casos de estudio reales donde se hayan aplicado simuladores de tráfico en la gestión del tráfico, extrayendo la información más relevante que pueda extrapolarse al caso de estudio en Salamanca.
- Investigar y analizar diferentes técnicas de optimización utilizadas en la gestión del tráfico centrándose en aquellas que han demostrado ser eficaces en la optimización de semáforos.
- Seleccionar una intersección específica en la ciudad de Salamanca como caso de estudio, teniendo en cuenta la importancia de la intersección y el nivel de congestión en la misma.
- Desarrollar una metodología de estudio que incluya la recopilación de datos relevantes para la intersección seleccionada, la calibración del simulador de tráfico, la definición de parámetros y restricciones y la implementación de una técnica de optimización.

## 1.2. Impacto esperado – Objetivos de Desarrollo Sostenible

En este apartado se aborda el impacto esperado del proyecto y su potencial contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Los ODS son una serie de metas establecidas por las Naciones Unidas en su agenda 2030 para abordar los principales desafíos sociales, económicos y ambientales a nivel mundial [94].

Los avances en simuladores de tráfico y técnicas de optimización ofrecen nuevas oportunidades para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de la movilidad urbana como: la reducción de las emisiones [83], la planificación sostenible de las ciudades y la calidad del transporte con el fin de lograr una gestión eficiente del tráfico que permita obtener un desarrollo urbano equitativo, resiliente y respetuoso con el medio ambiente [35]. Los ODS directamente abordados en este trabajo son [94]:

- **Objetivo 3 – Salud y bienestar:** La creciente urbanización y el congestionamiento vehicular ha favorecido el aumento de la contaminación del aire urbano [81]. La contaminación atmosférica produce graves problemas de salud en la población entre los que se encuentran alteraciones en la función pulmonar, problemas cardiovasculares y respiratorios. Esto produce una reducción en la calidad de vida [84]. El uso de los semáforos inteligentes permite reducir las emisiones de ruido, CO<sub>2</sub>, CO, partículas volátiles, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno, mejorando la calidad de vida de los ciudadanos [83][9].
- **Objetivo 8 – Trabajo decente y crecimiento económico:** Una de las metas del ODS 8 se basa en fomentar el consumo eficiente de los recursos mundiales y lograr un equilibrio entre el crecimiento económico y la protección del medio ambiente. El empleo de simuladores de tráfico contribuye a analizar y mejorar la administración del tránsito y el transporte, generando un conjunto de mecanismos para ajustar la forma en la que se presta el servicio urbano en las ciudades, reduciendo de la congestión y del tiempo de tránsito. También, se pretende limitar las emisiones en línea con la capacidad del planeta para absorberlas, minimizar el consumo de recursos no renovables [75].
- **Objetivo 9 – Industria, innovación e infraestructura:** La realización de este trabajo contribuye al ODS 9, al impulsar la innovación en la gestión de tráfico a través del uso de simuladores de tráfico y técnicas de predicción y optimización. La aplicación de este estudio en toda la red de carreteras de Salamanca permitiría mejorar las infraestructuras existentes permitiendo la creación de un sistema de transporte sostenible, por ejemplo, mediante la reducción del consumo de combustibles al emplear semáforos con tiempos dinámicos [43].
- **Objetivo 11- Ciudades y comunidades sostenibles:** Con este trabajo se pretende mejorar la movilidad urbana utilizando sistemas inteligentes de tráfico para abordar problemas de congestión y movilidad de calles, carreteras e intersecciones [76]. Mediante la optimización de flujos de tráfico y el uso de técnicas de inteligencia artificial en la gestión de semáforos, se logra una movilidad más eficiente, reduciendo tiempos de viaje y mejorando la productividad del sistema. Además, esta gestión inteligente del tráfico contribuye a reducir el consumo de combustible y las emisiones contaminantes al evitar congestiones y embotellamientos [59], disminuyendo el tiempo de espera de los vehículos. Esto es especialmente relevante para lograr ciudades sostenibles y reducir la contaminación del aire [12].

### 1.3. Estructura de la memoria

Este documento se encuentra dividido en 7 secciones que se definen a continuación:

1. **Introducción:** En este capítulo se contextualiza el estudio y se proporciona una justificación de este. Además, se presentan los objetivos que se persiguen

con el trabajo y el impacto esperado basándose en los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

2. **Estado del arte:** Se centra en realizar una revisión exhaustiva de los diferentes simuladores de tráfico existentes en el mercado. Se analizan sus características y capacidades identificando cual es el más adecuado para el caso de estudio. Además, se revisan casos de estudio previos que hayan utilizado simuladores de tráfico, con el objetivo de extraer lecciones y mejores prácticas aplicables en el caso de estudio en Salamanca.
3. **Técnicas de optimización:** Esta sección se centra en realizar una revisión bibliográfica sobre las técnicas de optimización aplicadas en la regulación de flujos vehiculares. Se exploran diferentes enfoques y algoritmos utilizados para mejorar la eficiencia de los semáforos.
4. **Metodología:** En este apartado se desarrolla la metodología seguida a lo largo de todo el caso de estudio. Se incluye el proceso de selección y extracción de datos de la intersección de estudio y el análisis de los agentes implicados. Además, se describe la creación y ajuste del modelo empleando las herramientas SUMO, OpenStreetMap y netedit, así como la elaboración de los *scripts* necesarios.
5. **Caso de estudio:** Este capítulo se enfoca en la aplicación de la metodología desarrollada en una intersección específica de la ciudad de Salamanca. Se describe de manera detallada el caso de estudio y se explica como se implementó la metodología en dicho escenario.
6. **Resultados y discusión:** A lo largo de este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología. Se realiza un análisis y discusión de dichos resultados.
7. **Conclusiones:** En este último capítulo se realizan las conclusiones del trabajo. Se resumen los hallazgos más relevantes. Además, se proponen recomendaciones para futuras investigaciones en el área de la optimización semafórica y la gestión de tráfico.

## 2. Estado del arte

Debido al complejo sistema vial de las ciudades, que involucra intersecciones, avenidas y cruces peatonales, se generan interrupciones periódicas en el flujo vehicular lo que resulta en problemas de congestión de tráfico y tiempos de espera elevados [32]. El sistema de carreteras tradicional se gestiona mediante intersecciones y enlaces. Las intersecciones pueden ser señalizadas o no señalizadas. Una intersección señalizada es aquella que está regulada por un conjunto de señales, como semáforos, que regulan el flujo de tráfico [105]. Estos sistemas ayudan a evitar accidentes, reducir los tiempos de espera y disminuir tanto el consumo de combustible como las emisiones de gases contaminantes [29].

Los semáforos tradicionales son sistemas automáticos con una política de cambio de señales fijas; es decir, los semáforos siempre operan de la misma manera, independientemente del flujo vehicular y el número de peatones. Esto genera un problema, ya que no se adapta a las necesidades variables de los usuarios de la vía, lo que puede prolongar los tiempos innecesariamente [37]. Por ejemplo, un semáforo con botón habilitado cerrará el flujo vehicular durante el mismo tiempo, ya sea para permitir el cruce de un solo peatón o de varios [96]. Por esta razón, las ciudades requieren sistemas de transporte más eficientes junto con un óptimo control del tráfico. Es particularmente importante contar con una política de control de semáforos en las intersecciones que permita reducir la congestión y la saturación de vehículos [63][102].

La política de semaforización tradicional puede ser mejorada mediante el uso de sistemas inteligentes, como los semáforos inteligentes, que toman decisiones en función del tráfico existente en cada momento [37]. Un semáforo inteligente se caracteriza por su capacidad para tomar decisiones de forma autónoma [21]. Para lograrlo, detectan el flujo vehicular a través de sensores y ajustan los tiempos de paso o detención según los valores obtenidos [56][53]. Existen diferentes sistemas de semaforización inteligente, entre ellos destacan [18]:

- **Semaforización Inteligente usando Tarjetas RFID:** Implica la colocación de tarjetas RFID en los vehículos, lo que permite generar tiempos de espera en los puntos de intersección en función de la congestión vehicular. Mediante el uso de una antena, se captura un código único asociado a cada tarjeta, registrando la presencia del vehículo para su procesamiento en un servidor.
- **Semaforización Inteligente usando Redes de Sensores Inalámbricos:** La red de sensores inalámbricos es un conjunto de sensores que miden datos como el número de vehículos, la velocidad de cada uno y el espacio de separación entre ellos. Estos datos se envían a una estación base para su procesamiento.
- **Semaforización Inteligente usando Procesamiento de Imágenes:** Consiste en recopilar información a través de sensores ópticos. Se capta una imagen de la que se obtiene diferentes datos, como la velocidad, la distancia o la posición de los vehículos. Como se observa en la Figura 2, este sistema se compone de 3 elementos: un sensor óptico, semáforos y un controlador de tráfico.

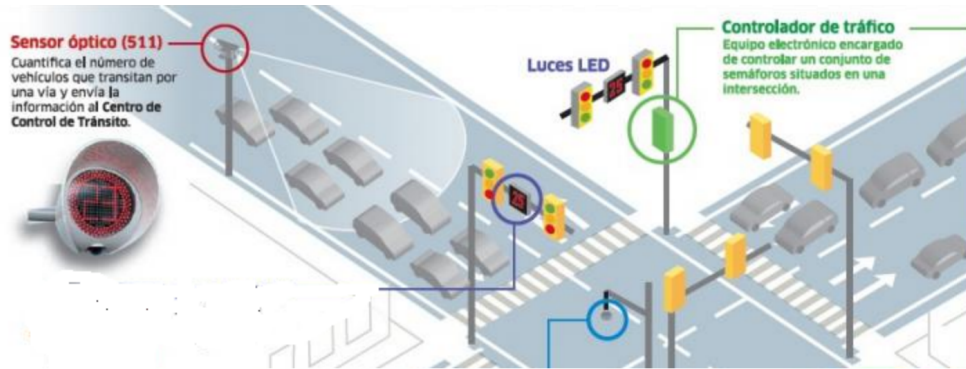


Figura 2: Elemento de un sistema de semaforización inteligente mediante procesamiento de imágenes [18].

La semaforización inteligente utilizando el procesamiento de imágenes presenta varias ventajas en comparación con los otros dos tipos de sistemas mencionados. En primer lugar, permite una detección más precisa y detallada de los vehículos y su comportamiento en la intersección. Esto permite ajustar los tiempos de paso de manera más precisa, optimizando la fluidez del tráfico. Además, el procesamiento de imágenes puede proporcionar información adicional como la identificación de vehículos de emergencia o el comportamiento de los conductores [17].

## 2.1. Simuladores de tráfico

La ingeniería de transporte y la gestión del tráfico urbano son áreas de estudio fundamentales en el desarrollo sostenible de las ciudades. El modelado computacional, a través de simuladores, es una rama de la informática que ayuda a otras disciplinas al explorar la dinámica de fenómenos complejos bajo observación; proporcionando teorías, herramientas y tecnologías de modelado y simulación [61]. Los simuladores de tráfico se clasifican en tres tipos; macroscópicos, microscópicos y mesoscópicos [97]:

- **Simuladores macroscópicos:** Los simuladores macroscópicos se enfocan en el estado general del tráfico proporcionando atributos como la densidad de vehículos, la velocidad promedio y el flujo del tráfico [8]. Estos simuladores describen el tráfico a nivel genérico tratándolo como un flujo sin distinguir sus componentes individuales, como puede ser, el cambio de carril de un vehículo [16]. Este tipo de simuladores no precisan tantos parámetros para calcular los datos requeridos. Entre los modelos de simulación macroscópica se encuentra el modelo de asignación de equilibrio, que analiza la ruta más óptima desde un punto A hasta un punto B [42].
- **Simuladores microscópicos:** Los simuladores microscópicos analizan el comportamiento genérico en el espacio tiempo de cada uno de los vehículos de forma individual, así como sus interacciones [16]. Estos modelos permiten definir las interacciones y atributos de cada vehículo: como la velocidad, la aceleración

y el consumo de combustible [8]. A diferencia de los simuladores macroscópicos, los simuladores microscópicos prestan una atención detallada a cada vehículo, lo que les permite obtener conclusiones más precisas y cercanas a la realidad [42].

- **Simuladores mesoscópicos:** Los simuladores mesoscópicos son una aproximación intermedia entre los modelos microscópicos y macroscópicos, combinando características de ambos enfoques [16]. En lugar de rastrear vehículos individuales, estos modelos se centran en el comportamiento de grupos de entidades de tráfico, representando actividades e interacciones con un nivel de detalle reducido. Por ejemplo, las maniobras como el cambio de carril se representan como eventos instantáneos para un grupo de vehículos, basándose en factores como la densidad relativa de carriles y las diferencias de velocidad. Al especificar el comportamiento de los individuos en términos probabilísticos, los modelos mesoscópicos permiten una descripción más generalizada del tráfico [42].

Estos diferentes tipos de simuladores de tráfico ofrecen enfoques complementarios para el estudio y la optimización de sistemas de transporte. La elección del tipo de simulador adecuado depende de las características específicas, del caso de estudio y de los objetivos planteados ya que, cada tipo de simulador tiene sus ventajas y desventajas en términos de nivel de detalle y precisión.

## 2.2. Estudio de los principales simuladores del mercado

La simulación por ordenador ha revolucionado la capacidad de modelar y estudiar entornos complejos, proporcionando herramientas eficientes para probar y evaluar modelos científicos. En el ámbito del transporte, los simuladores de tráfico desempeñan un papel fundamental al permitir la exploración de la dinámica del tráfico y evaluar diferentes escenarios de forma virtual [24]. En el mercado existen diferentes simuladores de tráfico que permiten realizar esta tarea. La elección del más adecuado dependerá de las necesidades del caso de estudio [48]. Entre los simuladores más conocidos se encuentran los representados en la Figura 3.

En la Figura 3, se clasifican los simuladores por su tipo (microscópico, macroscópico y mesoscópico), tipo de licencia, modelado del tiempo en la simulación (discreto y continuo), la posibilidad de configurar los peatones, los tipos de vehículos y los modelos de visualización respectivamente. A lo largo de los siguientes apartados se explican los principales simuladores ampliando la información particular de cada uno, que de manera general se resumen en la Figura 3.

### 2.2.1. Simulador VISSIM

VISSIM es un simulador de tráfico microscópico capaz de modelar el comportamiento vehicular teniendo en cuenta condiciones complejas. Este simulador permite

<i>Simulators</i>	Type	Category	Discrete/ continuous	Pedestrians	Vehicle types	Visualization
<i>MITSIM</i>	Microscopic	Open source	Discrete	No	All vehicles are the same	2D
<i>VISSIM</i>	Microscopic	Partially commercial	Continuous	Yes	Buses and trams	Both
<i>SIM-R</i>	Microscopic	Open source	Continuous	No	Buses and trams	3D
<i>SUMO</i>	Microscopic	Commercial	Continuous	No	All vehicles are the same	2D
<i>Paramics</i>	Microscopic	Commercial	Discrete	Yes	Buses and trams	Both
<i>AIMSUN</i>	Micro/ mesoscopic	Commercial	Continuous	Yes	Buses and trams	Both
DTALite	Mesoscopic	Commercial	Discrete	No	All vehicles are the same	Both
TransModeler	Macroscopic and can be macro/ micro	Open source	Discrete	Yes	All vehicles are the same	Both
KSUTraffic	Microscopic	Open source	Discrete	Yes	Buses and trams	2D

Figura 3: Simuladores de tráfico existentes en el mercado [7].

recrear patrones de tráfico mostrando las interacciones entre todos los usuarios de la carretera. Además, permite la toma de decisiones de enrutamiento de vehículos y el uso de matrices Origen-Destino basadas en la densidad vehicular. Como resultado VISSIM ofrece; comparación de resultados de escenarios y posibilidades de evaluación mejoradas [24].

Mediante el simulador VISSIM se obtienen resultados como la efectividad, demora total, tiempo de espera, longitud de cola, consumo de combustible y la emisión de gases [101]. Además, VISSIM es capaz de simular flujos de tráfico multimodales, incluyendo peatones, ciclistas, motocicletas, automóviles, camiones, autobuses, tranvías, tren ligero y tren pesado. Su flexibilidad y características lo convierten en una herramienta útil para la ingeniería de tráfico y la planificación del transporte [28]. En la Figura 4 se observa una simulación de un ramal realizada en VISSIM.



Figura 4: Simulación de una intersección realizada en VISSIM [24].

### 2.2.2. Simulador AIMSUM

AIMSUM es un sistema de simulación desarrollado por la Universidad de California que contribuye a la toma de decisiones en la gestión de tráfico en tiempo real [13]. Este simulador ofrece una amplia gama de funcionalidades para la planificación y evaluación de sistemas de transporte. Este entorno integra el modelado de demanda de viajes y un simulador híbrido mesoscópico-microscópico. Entre sus características se destaca el uso de matrices Origen-Destino basadas en la oferta y demanda de tráfico, la capacidad de distinguir diferentes tipos de vehículos, manejar una amplia gama de tipos de vías [101], así como la capacidad de aleatorizar las rutas de los vehículos. Como resultado, se obtiene un cálculo óptimo de las estadísticas de tráfico y mapas de las zonas de interés [24]. En la Figura 5 se observa una simulación realizada con AIMSUM.

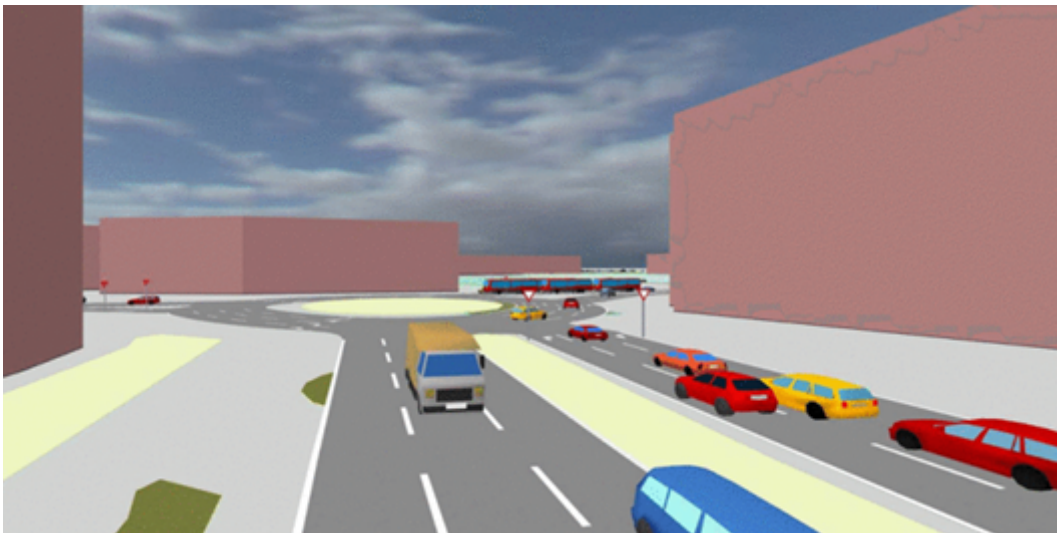


Figura 5: Simulación de una intersección realizada en AIMSUM [24].

### 2.2.3. Simulador SUMO

Simulation of Urban Mobility (SUMO) [Figura 6] es un paquete de simulación de tráfico vial microscópico, portátil y de código abierto con posibilidad de ser empleado para grandes redes viales. SUMO permite incorporar datos de bicicletas, motocicletas, turismos, peatones y transporte público; además, es capaz de modelar el tráfico multimodal [30]. Este paquete proporciona una gran variedad de características y herramientas que permiten medir [24]:

- Tráfico de carril perimetral: Los carriles perimetrales son los carriles ubicados en los bordes exteriores de la red vial característicos de las vías con mayor capacidad y flujo elevado. Mediante el monitoreo del tráfico perimetral, SUMO proporciona información sobre el rendimiento general de la red incluyendo densidad de vehículos, velocidad promedio y capacidad de la red.

- Información del viaje: Se refiere al conjunto de datos sobre el viaje de cada vehículo durante la ejecución de la simulación. Estos datos son el origen, el destino, la ruta seguida, el tiempo de viaje y otras métricas relevantes.
- Información de rutas de vehículos: Son los datos detallados de las rutas específicas por cada vehículo durante la simulación. Estos datos incluyen los segmentos de carretera utilizados y las maniobras realizadas, como cambios de carril y giros.

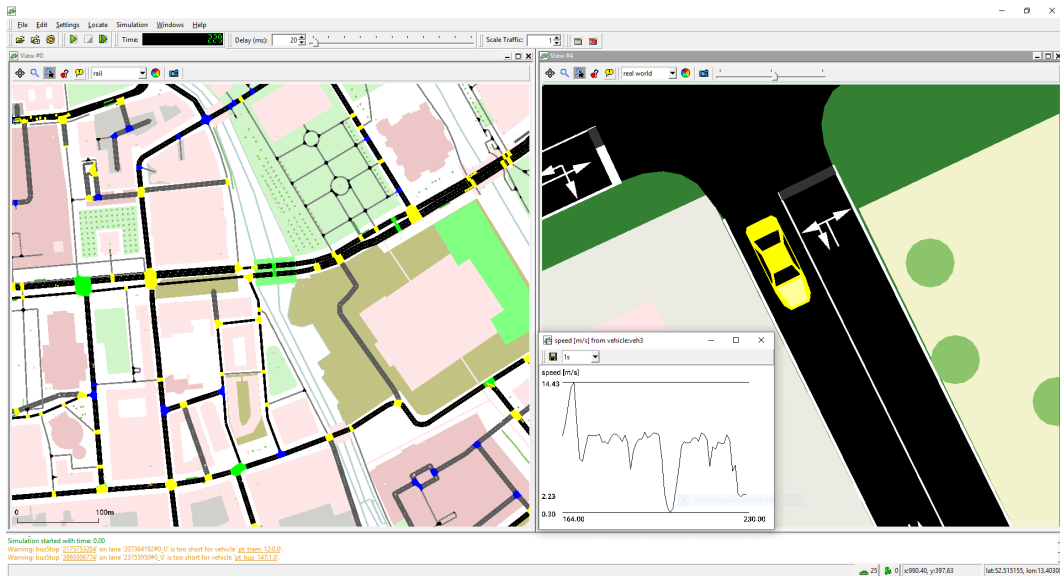


Figura 6: Visualización mediante el simulador SUMO [52].

Este paquete permite la definición manual de rutas y de vehículos. Como herramienta de código abierto implementada en C++, SUMO permite implementar nuevos modelos y controlar la simulación empleando diferentes entornos de programación [38]. SUMO desarrolla un flujo continuo de información y acciones definido en los siguientes pasos [Figura 7][49]:

- *Traffic Management*: Esta etapa implica la implementación de estrategias y medidas para gestionar el tráfico de forma eficiente.
- *Traffic Control and Routing Devices*: Esta etapa implica el estudio mediante dispositivos de control y enrutamiento del tráfico. Estos dispositivos son elementos físicos o virtuales empleados para regular y dirigir el flujo de vehículos.
- *Microscopic Traffic Simulator*: Durante esta etapa se realiza una simulación detallada e individual del comportamiento de cada vehículo. El simulado reproduce las interacciones entre los vehículos, los dispositivos de control y la carretera.
- *System Traffic Monitoring*: En esta fase se recopila información sobre el estado y el rendimiento general del sistema de tráfico.

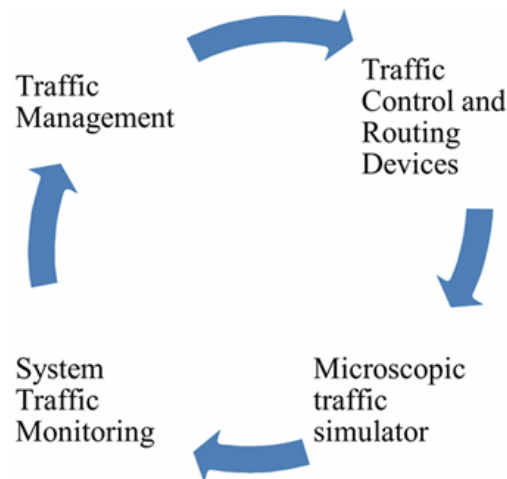


Figura 7: Etapas de SUMO y sus interacciones [49].

SUMO también ofrece un alto rendimiento en la simulación a través de la API de TraCI, permitiendo realizar simulaciones en línea. Con su gran comunidad de usuarios, gran flexibilidad, facilidad de uso y su contante evolución que mantiene sus características modernizadas, SUMO es una herramienta destacada en el campo de la simulación del tráfico [103].

### 2.2.4. Simulador PARAMICS

PARAMICS [Figura 8] es un *software* de simulación que proporciona una representación gráfica detallada de escenarios de tráfico a nivel microscópico [54]. Su objetivo principal es proporcionar datos y medidas estadísticas esenciales para la resolución de problemas de congestión vehicular, entre otros [77]. Una de las limitaciones de esta herramienta es que en ocasiones es necesario realizar ajustes manuales de los parámetros predeterminados hasta que los resultados de la simulación coincidan con las observaciones reales, como flujos de tráfico o tiempos de viaje [22]. Para abordar esta limitación, se busca una metodología de calibración que considere la naturaleza interna de las simulaciones microscópicas, mejorando así el proceso de calibración manual [50].

### 2.2.5. Simulador TRANSMODELER

TRANSMODELER [Figura 9] es una plataforma de simulación de tráfico enfocada en la planificación y gestión de tráfico, incluyendo situaciones de emergencia. Mediante este *software* se crean simulaciones que representan el flujo de vehículos, el funcionamiento de las señales de tráfico y el rendimiento general de la red de transporte, incluyendo el transporte público, el tráfico de bicicletas y de camiones. Además, este *software* tiene una interfaz gráfica para gestionar la salida donde el usuario puede interactuar con las salidas del proceso y actualizar los gráficos automáticamente usando múltiples opciones de filtro [45].

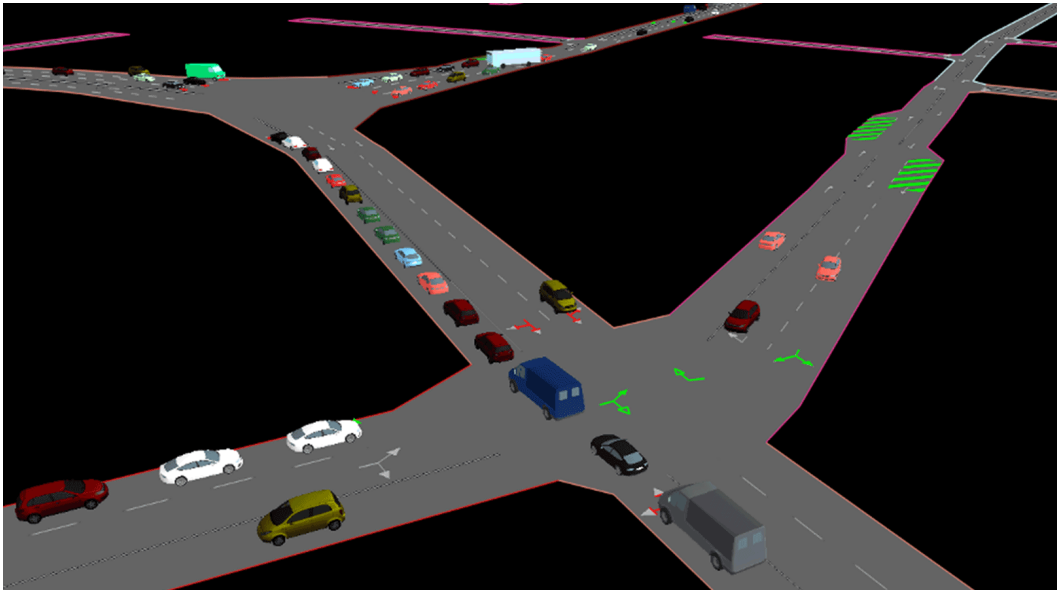


Figura 8: Visualización mediante el simulador PARAMICS [1].

### 2.3. Casos de uso de simuladores de tráfico

Los simuladores de tráfico han sido ampliamente utilizados en diferentes lugares del mundo con el objetivo de comprender y mejorar la gestión de los sistemas viales. En este apartado se presentarán algunos ejemplos destacados de la aplicación de simuladores de tráfico en diferentes ciudades de Ecuador, Perú, España, China y Marruecos.

#### 2.3.1. Quito (Ecuador) – Simulador SUMO

El artículo “*Google Maps Route Color Mapping with SUMO Simulator*” de R. Mena et al. [58] plantea como el uso de simulador SUMO en la ciudad de Quito. En este artículo se seleccionaron las tres vías principales de acceso del distrito metropolitano de Quito con el fin de obtener los rangos de velocidad del tránsito vehicular correspondientes a los colores presentados en las vías de Google Maps. Los colores establecidos por Google Maps para representar son: verde, naranja y rojo que marcan la densidad vehicular de menor a mayor.

Cada escenario se simuló en tres franjas horarias diferentes. Esto ha implicado emplear las estadísticas del tráfico de esos horarios como parámetros de entrada para la densidad vehicular. Para ello, se emplearon sensores que permiten obtener datos de velocidad en uno o varios puntos específicos colocados como se muestra en la Figura 10. Con este fin, se creó un archivo adicional denominado “*sensores.xml*”, en el que se definen los atributos para cada sensor, incluyendo el identificador y su posición de colocación.

Una vez analizados los resultados, el estudio concluyó el rango de velocidades adecuado para las carreteras analizadas. Esto facilita la utilización de estos datos

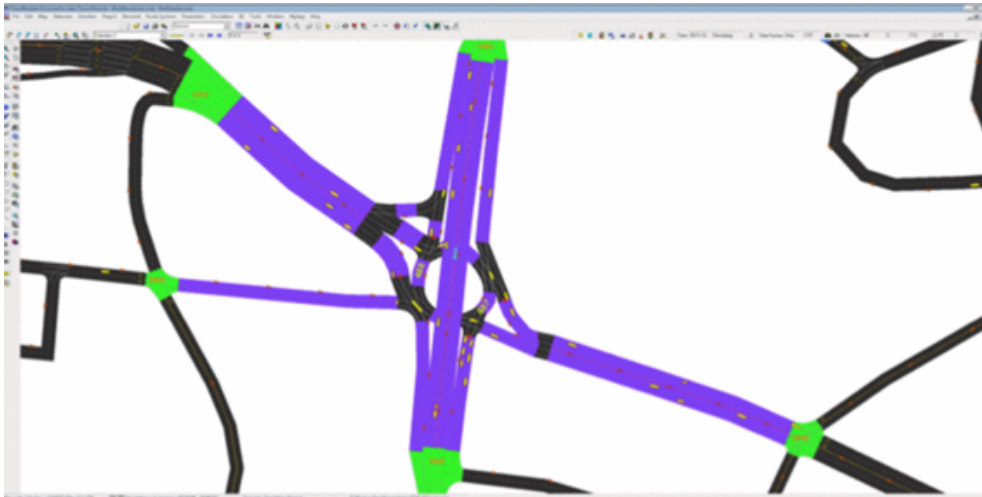


Figura 9: Visualización mediante el simulador TRANSMODELER [45].

como variables de entrada en futuros escenarios de simulación.

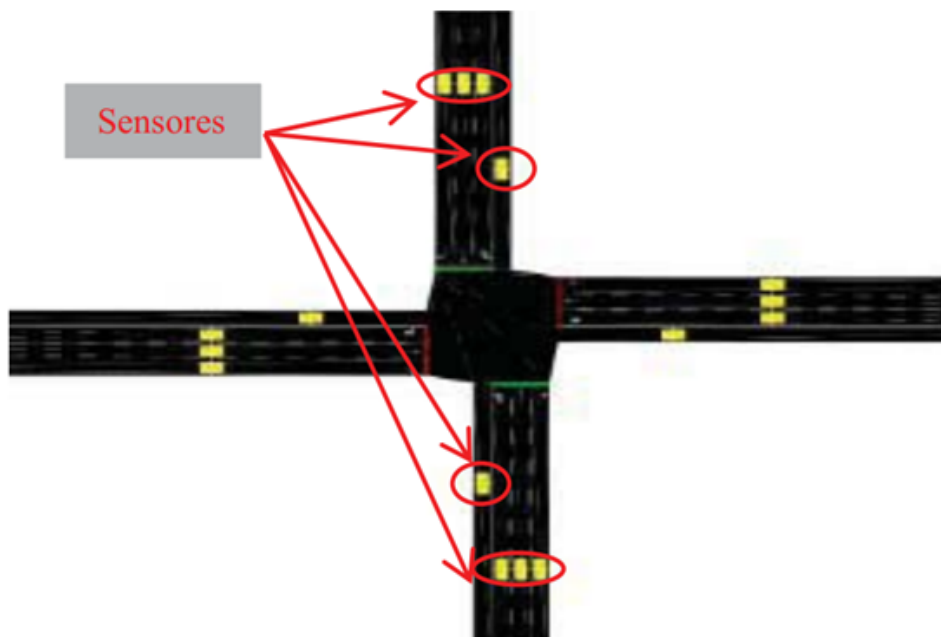


Figura 10: Colocación de sensores para la obtención de información en el simulador SUMO [58].

### 2.3.2. Lima (Perú) – Simulador VISSIM

En el artículo “*Design of mini roundabouts with adaptive traffic lights to improve vehicular travel times and roundabout capacity in metropolitan cities*” de C. Cisneros et al. [19] se presenta una propuesta con el objetivo de reducir los tiempos de viaje y aumentar la capacidad vehicular de la Plaza de Bolognesi [Figura 11].

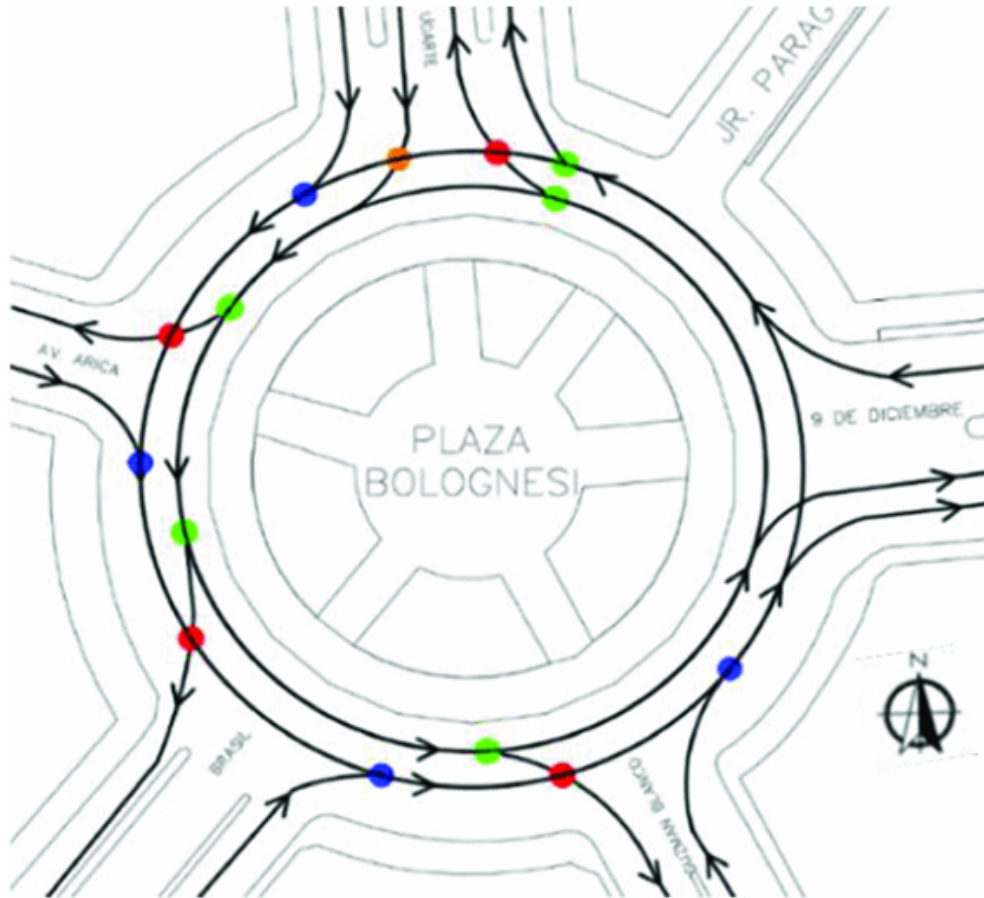


Figura 11: Puntos de conflicto en la rotonda de Plaza Bolognesi (Lima).

Esta propuesta combina rediseños geométricos basados en mini rotondas con la implementación de semáforos adaptativos en rotondas urbanas. A nivel metodológico, este artículo se divide en los siguientes pasos:

1. Recopilación de información: Se realiza una recopilación de datos topográficos, conteo de vehículos y peatones, registro de ciclos semafóricos y estudio de los diferentes conflictos que surgen en la rotonda. Un punto de conflicto es el lugar donde se puede dar el cruce de dos vehículos interrumpiendo el flujo vehicular. Estos puntos están diferenciados por colores siendo; convergencia, divergencia y dos tipos de cruces [Figura 12].
2. Tratamiento de la información: Se procesan las rutas y los datos recopilados obteniendo un esquema detallado de la rotonda con las capacidades de cada vía.
3. Microsimulación en VISSIM: Se realiza una simulación detallada del estado actual de la rotonda. Con ella, se comparan la media de los tiempos de las rutas críticas que se han estudiado en los pasos anteriores para comprobar su precisión.
4. Realización del diseño geométrico: Atendiendo a los resultados se diseña una





Item	Conflict	Description
	Convergence	Conflict between inflow and circulating
	Divergence	Circulating flow division
	Interlace	Internal circulating flow conflict leaving the roundabout
	Interlace	Conflict between input flow with external circulating flow

Figura 12: Tipos de conflicto detectados.

nueva configuración geométrica para la rotonda respetando las normas de circulación del país.

5. Implementación de semáforos inteligentes: Se realiza un escenario adicional en el cual se añaden semáforos inteligentes con sensores en la calzada, los cuales regulan el flujo de vehículos en función de la saturación de las vías.

Como resultado de este estudio, se concluye que la aplicación del nuevo diseño geométrico [Figura 13] mejora la capacidad de la rotonda en un 31,5 % y reduce los tiempos de viaje.



Figura 13: Modelo de propuesta geométrica en VISSIM.

### 2.3.3. Valencia (España) – Simulador SUMO

En el artículo “*Solución para la gestión de tráfico de Valencia en base a criterios ambientales*” de M. Terol et al. [88] se ofrece una alternativa de ruta que considere criterios ambientales. El propósito se basaba en desviar el tráfico de las zonas más contaminadas para minimizar la circulación y descongestionar las zonas más concurridas. Para lograrlo, se realizó un análisis de la reducción de velocidad adecuada. Además, se evaluó como afecta el cierre de algunas vías al tráfico general de la ciudad.

En el trabajo se muestran diferentes tipos de vías que se pueden clasificar en: avenidas con mayor longitud y más de un carril, vías comunes y vías de un solo

carril que por su ubicación y dirección experimentan un mayor flujo de vehículos. Como ejemplo, se analizaron los resultados de la Calle del Almirante Cadarso para determinar cómo afectaría al tráfico el cierre de la calle. Posteriormente, se simuló el tráfico que circulaba por la ciudad manteniendo la calle cerrada y desviando el tráfico hacia vías cercanas. Como resultado, se observó un pequeño aumento de la distancia recorrida por los vehículos, aunque no representaba un incremento sustancial. En conclusión, el cierre de esta vía no influía de forma considerable en los tiempos y distancias recorridas por los vehículos, pero sí que reducía la contaminación en la ciudad de Valencia.

### 2.3.4. Málaga (España) – Simulador SUMO

En el artículo “*Validación inteligente para la Sincronización de Semáforos Basada en Feature Models*” de J.Ferrer et al. [30] se propone una estrategia de validación para la generación automática de diferentes escenarios que permitan comprobar la robustez de los programas semafóricos. Este sistema se basaba en *Feature Models* (Modelos de características). En este estudio se planteó como caso de estudio la ciudad de Málaga [Figura 14] y se validaron los programas de semáforos generados mediante cuatro algoritmos de optimización.



Figura 14: Representación del mapa de Málaga exportado al formato de SUMO.

En conclusión, este trabajo presenta una estrategia de validación que emplea Feature Models y la generación automática de escenarios ponderados para la mejora de la robustez de los programas de semáforos. La realización de este estudio en cualquier escenario permitiría obtener información sobre el programa de semáforos de la ciudad y conocer el sistema semafórico que mejor se adaptaría a un mayor porcentaje de situaciones de tráfico diferentes.

### 2.3.5. Jinhua (China) – Simulador VISSIM

En el artículo “*Study on the Evaluation of Microcirculation Traffic Organization Optimization in old Urban Area Based on Microscopic Simulation*” de Y. Zhao [106] se estudió la red de tráfico del casco antiguo de Jinhua [Figura 15]. El problema de esta zona se basaba en una elevada congestión vehicular que no podía ser solucionada con la adición de carriles debido a la planificación urbana. Para solucionarlo, el

trabajo propone una redistribución del tráfico hacia un sistema unidireccional y un posterior análisis comparativo con el modelo bidireccional.

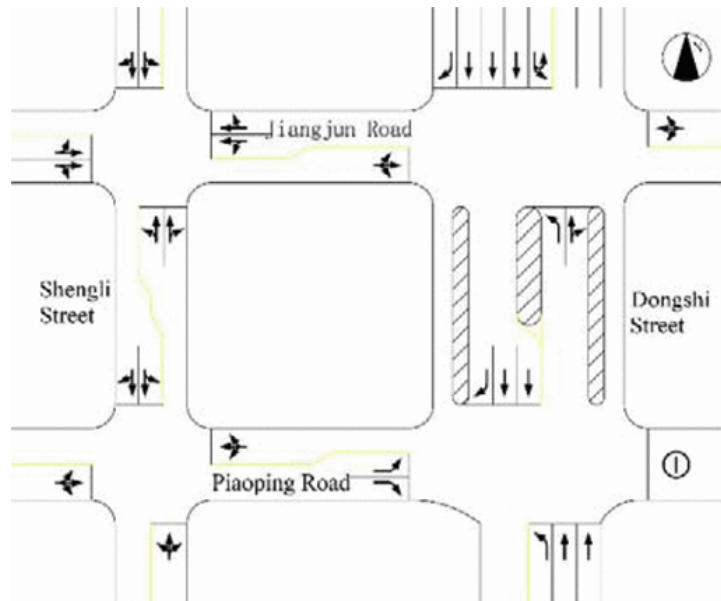


Figura 15: Diagrama esquemático del esquema de canalización de intersección optimizado.

Los resultados muestran que, en comparación con el sistema de tráfico bidireccional, la congestión del tráfico ha mejorado significativamente desde la implementación del tráfico unidireccional.

### 2.3.6. Kenitra (Marruecos) – Simulador SUMO

El artículo “*Modeling the Flow of road traffic with the SUMO simulator*” de S. Haddouch [38] realiza una revisión literaria de diferentes modelos de enrutamiento y planificación del tráfico para el modelado del tráfico vial. El estudio se centra en determinar el nivel de detalle y los marcos matemáticos utilizados en los modelos estudiados. Además, se realiza un análisis crítico de las perspectivas de investigación que consideran el desarrollo de modelos de tráfico empleando el simulador SUMO. Como caso de estudio, se planteó el conteo de vehículos en las principales vías de Kenitra [Figura 16]. Para ello, se seleccionaron posiciones estratégicas de conteo cubriendo toda la red vial y se realizó el conteo de vehículos correspondiente a las horas punta. Con los resultados obtenidos se validó SUMO para estudios futuros de tráfico vial que involucren redes de carreteras de densidad media.



Figura 16: Diseño de la red de carreteras de Kenitra implementado en el estudio.

### 3. Técnicas de optimización

En la actualidad, la optimización se ha convertido en una práctica habitual en el ámbito de la investigación, con el objetivo de encontrar la mejor solución a un problema o sistema, reduciendo costos y tiempo [11]. Muchos problemas de optimización pueden ser abstraídos y modelados como problemas de optimización de funciones, los cuales sirven como referencia para probar algoritmos de optimización [85].

Uno de los ámbitos en los que se aplica la optimización es el flujo vehicular. Una vez construidos los posibles escenarios en el simulador, es necesario aplicar algoritmos de optimización para encontrar el mejor escenario posible, es decir, modificar los elementos o características del sistema para cumplir una función objetivo. La función objetivo puede cubrir un amplio abanico de posibilidades, como la reducción de los tiempos de viaje o el aumento de la durabilidad del combustible [91].

Durante el proceso de optimización, es importante que la solución definitiva constituya una mejora global. Es decir, la solución debe tener en cuenta el escenario al completo y constituir una mejora para el flujo en todo el marco de estudio [15].

En el trabajo se describen 5 algoritmos o métodos de optimización diferentes entre sí, con el fin de proporcionar información sobre sus características. Los algoritmos descritos son: algoritmos genéticos, algoritmo de optimización por enjambre de partículas (conocida como PSO, por sus siglas en inglés, *Particle Swarm Optimization*), aprendizaje por refuerzo, optimización por lógica difusa y optimización por agentes inteligentes. La elección de un algoritmo u otro dependerá de las necesidades de la investigación.

#### 3.1. Algoritmo genético

Los algoritmos genéticos (AG) son algoritmos de optimización basados en la selección natural definida por Darwin. Estos algoritmos constan de una función matemática que selecciona los individuos óptimos para generar la siguiente generación. El algoritmo trabaja con una población de individuos, donde cada individuo se representa mediante un “cromosoma” que codifica las variables del problema a resolver. Es decir, cada individuo representa una solución factible al problema. La calidad de la solución se medirá mediante un valor asignado para ello [87].

Los algoritmos genéticos son un tipo de algoritmo evolutivo, inspirados en los procesos adaptativos de los sistemas naturales [73]. En las siguientes generaciones, las poblaciones evolucionan mediante operadores genéticos [2]. El objetivo de los algoritmos evolutivos es mejorar los resultados mediante mutaciones que combinan características para posteriormente seleccionar los mejores candidatos [20][44].

El proceso de selección elige los individuos mejor adaptados para formar la siguiente de una generación. A lo largo de las generaciones, las características favorables se propagan en la población. Además, se emplean operadores inspirados en la

evolución como el cruce o la mutación [57]. El operador de cruce intercambia propiedades entre individuos, mientras que el operador de mutación introduce cambios aleatorios en la población para ampliar el espacio de búsqueda [39].

Para implementar un AG, es necesario definir una función de costo que evalúe a los individuos, una codificación que represente las soluciones, operadores de selección, cruce y mutación, y definir el tamaño de la población y las probabilidades asociadas a cada operación. Estos parámetros influyen en la capacidad del algoritmo para encontrar la mejor solución [73]. Con un diseño adecuado, el Algoritmo Genético converge hacia una solución óptima de los problemas. Los algoritmos genéticos siguen un flujo ordenado representado en la Figura 17.



Figura 17: Flujo de los algoritmos genéticos [57].

Un ejemplo particular del uso de Algoritmos Genéticos es su aplicación en el control de semáforos. Algunos autores han utilizado AG para reducir el tiempo de espera en las intersecciones de tráfico. Demostrando su eficacia en la optimización del control de semáforos y la reducción del tiempo de espera promedio del tráfico [5].

La principal desventaja de este algoritmo es que su eficacia depende del tamaño de la población y del número de interacciones. A mayor población e iteraciones, mejor será la solución encontrada, lo que dificulta su aplicación en poblaciones pequeñas [91].

### 3.2. Optimización por enjambre de partículas

El algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO) es un método heurístico que se inspira en el comportamiento social de una población o enjambre de aves u organismos que cooperan entre sí en busca de alimento [51]. Este algoritmo se utiliza para resolver problemas al mejorar iterativamente las soluciones candidatas en función de una medida de calidad específica según la función objetivo implementada. En PSO, cada posible solución se representa como una partícula en el espacio y tiene asociados un valor de aptitud y una velocidad [66]. El algoritmo comienza con un grupo de partículas aleatorias y busca de forma iterativa las mejores soluciones, actualizando las partículas en las próximas iteraciones [23][40]. Al actualizar cada partícula, se tienen en cuenta los valores “*pbest*” y “*gbest*”, que representan la mejor solución lograda por esa partícula hasta el momento y la mejor solución encontrada por cualquier partícula de la población, respectivamente [68].

El PSO presenta similitudes con los AG, como la inicialización aleatoria de la población y la búsqueda de soluciones óptimas a través de generaciones [87]. Sin embargo, PSO no utiliza operaciones como el cruce y la mutación. En su lugar, las partículas actualizan su posición y velocidad en función de las mejores soluciones encontradas hasta el momento [100].

En el ámbito de los semáforos, el algoritmo PSO ha sido empleado como optimizador para determinar programas de ciclos semaforicos con éxito. Además, el uso de PSO se extiende a problemas de optimización en los campos de la electricidad, industria química, medicina y economía [71]. Este algoritmo muestra una convergencia rápida a soluciones adecuadas, lo cual es deseable cuando es necesario modificar la duración de los ciclos semaforicos en tiempo real [15]. Otra ventaja de este algoritmo es su facilidad de implementación y sus parámetros sencillos [33][72].

### 3.3. Aprendizaje por refuerzo

El aprendizaje por refuerzo es una técnica de aprendizaje automático en la que un agente interactúa con su entorno y toma decisiones con el objetivo de maximizar la recompensa [104], lo que sirve para optimizar el modelo [90]. La recompensa es el *feedback* que el agente recibe del entorno después de realizar una acción. Esta puede ser positiva o negativa, dependiendo de si la acción tuvo un resultado favorable o desfavorable. Para ello, es necesario definir cuáles son los eventos favorables o desfavorables. El aprendizaje por refuerzo se basa en un modelo compuesto por estados, acciones y una función de recompensa [47]. El agente recopila información a través de ciclos de interacción con el entorno, utilizando tuplas que contienen estados, acciones, estados posteriores y recompensas. A medida que se repiten los ciclos, el agente aprende y determina que acciones son beneficiosas o no en diferentes situaciones [37]. La estructura general del algoritmo aprendizaje por refuerzo se muestra en la Figura 18.

El agente, en el aprendizaje por refuerzo, es el cerebro que aprende del entorno y realiza acciones para obtener la máxima recompensa. A través de iteraciones y

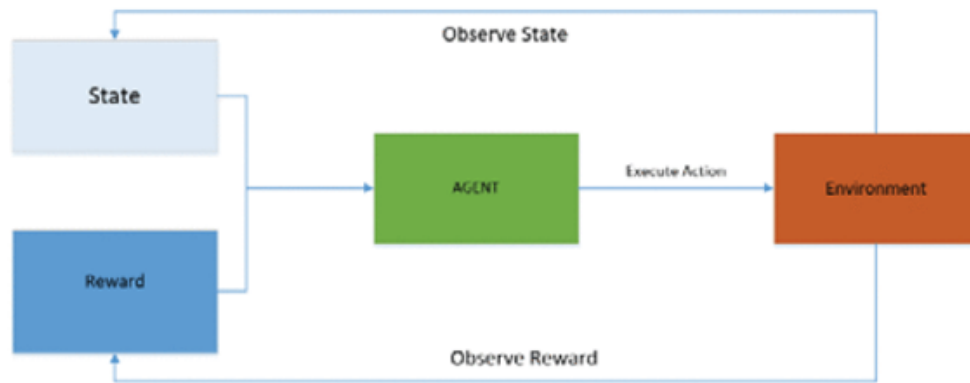


Figura 18: Estructura del algoritmo aprendizaje por refuerzo [107].

ensayo-error, el agente aprende una metodología óptima que maximice su recompensa [36].

En el contexto de control de tráfico, el objetivo de un agente de control de señales de tráfico comúnmente es, minimizar el tiempo promedio de viaje de los vehículos desde su origen hasta su destino. En el aprendizaje por refuerzo con control de semáforos, los espacios de acción se dividen en tres tipos: acciones binarias para modificar la fase actual, espacios de acción más grandes para seleccionar entre varias fases o programas de ciclos, y acciones continuas para determinar la duración de las fases. En la Figura 19 se observan las interacciones entre las diferentes partes de un sistema optimizador de sistemas mediante aprendizaje por refuerzo [10].

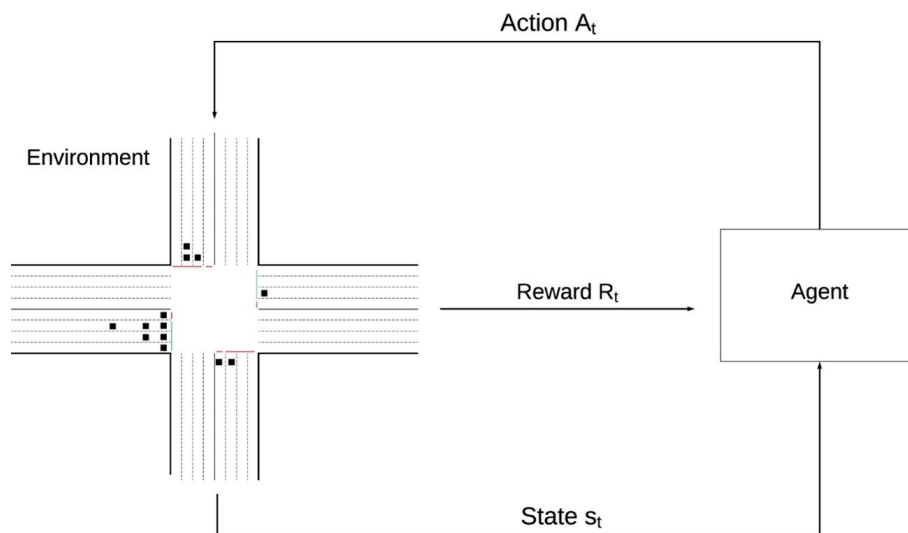


Figura 19: Proceso de aprendizaje por refuerzo para el problema de control de semáforos [10].

El aprendizaje por refuerzo está estrechamente relacionado con los Procesos de Decisión Markovianos (MDP). Los Procesos de Decisión Markovianos son una herramienta matemática empleada para modelar y formalizar problemas de toma de decisiones. Esto consiste en un conjunto de estados, un conjunto de acciones, una

función de transición que define las probabilidades de transición entre estados dada una acción, y una función de recompensa que asigna recompensas numéricas a las transiciones estado-acción [10].

### 3.4. Lógica difusa

La lógica difusa, también conocida como lógica borrosa, ha sido ampliamente utilizada en el campo de la ingeniería. Por ejemplo, esta técnica se ha aplicado en el control de señales de tráfico [46].

Los controladores de lógica difusa son sistemas basados en el conocimiento que incorporan el conocimiento humano a través de reglas *IF-THEN* y funciones difusas. Estos controladores permiten manejar datos lingüísticos e inexactos, como “poco” o “mucho” [60]. La inferencia difusa es el proceso de mapear una entrada a una salida empleando la lógica difusa, que implica funciones de pertenencia, operadores de lógica difusa y reglas *IF-THEN*. Existen dos tipos de sistemas de inferencia difusa; Mamdani o Sugeno [64].

En primer lugar, para emplear la lógica difusa, es necesario crear un conjunto de reglas que abarquen todos los posibles escenarios. Esto permite que el controlador tome las decisiones óptimas en cada momento [34]. A diferencia de la lógica booleana clásica, la lógica difusa permite representar una amplia gama de valores de entrada y salida, garantizando una transición suave entre los estados y una mayor adaptabilidad [98].

### 3.5. Agentes Inteligentes

Los agentes inteligente autónomos tienen la capacidad de administrar información de diversos sistemas. Estos agentes recolectan información en tiempo real de sensores con el objetivo de tomar decisiones más seguras y eficientes [14]. Según Brenner, *“Un agente software inteligente es un programa que puede realizar tareas específicas para un usuario y posee un grado de inteligencia suficiente para ejecutar parte de sus tareas de forma autónoma y para interactuar con su entorno de forma útil”*. Algunas características destacadas de los agentes inteligentes incluyen; autonomía, racionalidad, iniciativa y comunicación. Estos agentes tienen la capacidad de representar el conocimiento y aplicar modelos que permitan la inferencia sobre el mismo [65][69]. El comportamiento de un agente se rige por un ciclo de observar-pensar-actuar. El agente observa continuamente las condiciones del entorno mediante la recopilación de datos y utiliza su motor de inferencia para razonar y determinar las consecuencias de sus acciones en cada momento con el fin de tomar las decisiones adecuadas [41].

La arquitectura de una estructura de agentes inteligentes se compone de uno o más agentes que captan información del entorno gracias a sensores. Una vez captada la información, la procesan y actúan en consecuencia. En el caso de dos agentes o más agentes, también pueden tener un módulo de comunicación que permita la

interacción entre ellos con el fin de maximizar los resultados [70][Figura 20].

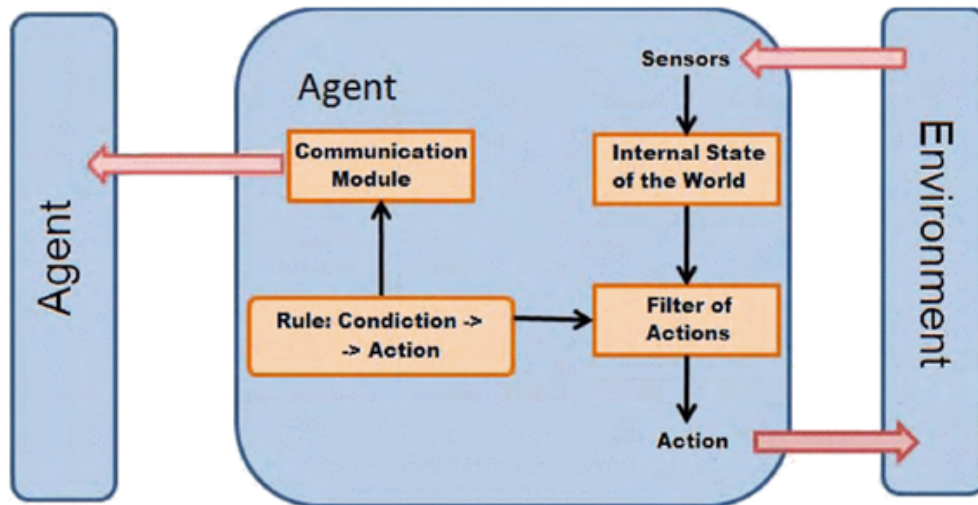


Figura 20: Diagrama de agente colaborativo [70].

Los agentes inteligentes se han empleado para resolver problemas en varios campos, incluyendo matemáticas, biología, física, sociología e ingeniería. En esta tecnología, las responsabilidades se delegan a agentes con roles y funciones cuidadosamente definidas. Lo que resulta una mejora inmediata en el rendimiento de la monitorización de los sistemas de transporte [4].

### 4. Metodología

A lo largo de este apartado se describe la metodología empleada para abordar el desafío de la optimización vehicular en una intersección, donde se consideran los siguientes elementos clave: coches, semáforos y, en un futuro cercano, cámaras que captarían información en tiempo real [15]. El objetivo principal de este trabajo es realizar la optimización de la gestión semafórica de un cruce de la ciudad de Salamanca mediante el uso de una técnica de optimización.

Para abordar este objetivo, se empleó el simulador SUMO junto con OpenStreet-Map, una fuente abierta de datos geoespaciales, y netedit, un editor del modelo de simulación [58]. SUMO proporciona una plataforma flexible y realista para modelar y simular el tráfico vehicular. Además, se utilizó la API de TraCI desde el *script* realizado en Python. Esta API permite acceder a las funcionalidades del simulador e implementar estrategias de recolección de datos y control semafórico. La elección de SUMO como simulador para este proyecto se justifica debido a su capacidad para modelar de manera precisa y detallada el comportamiento del tráfico en un entorno urbano, así como por su facilidad para realizar la implementación del *script* en Python [30][49].

En cuanto a la optimización del flujo vehicular, se utilizó el algoritmo PSO. Este algoritmo se basa en el comportamiento de los enjambres de partículas y es ampliamente utilizado en numerosas áreas. Aunque se podrían utilizar otros algoritmos, se ha decidido usar PSO debido a su facilidad de implementación empleando el lenguaje de programación Python [51].

La metodología del proyecto se divide en varias fases, como se muestra en la Figura 21. En primer lugar, se seleccionó una intersección para optimizar y se estudiaron los agentes de tráfico implicados en el proceso. Esto implicó analizar el flujo de tráfico actual y la distribución de los semáforos. A continuación, se procedió a la creación y ajuste del modelo de simulación empleando SUMO, OpenStreetMap y netedit. Se generó la representación virtual de la intersección y se configuraron los parámetros relevantes. Netedit se utilizó como herramienta para editar y visualizar el modelo de la simulación, permitiendo ajustes detallados en la geometría de la intersección. Una vez se completó el modelo, se crearon los *scripts* necesarios en Python para implementar el algoritmo PSO, realizar la optimización de los semáforos y automatizar el proceso realizando diversas optimizaciones. Estos *scripts* realizaron la comunicación con SUMO a través de la API de TraCI. En la siguiente fase, se ejecutaron los *scripts* realizando la optimización de los semáforos en la intersección. Finalmente, se realizó un análisis de los resultados obtenidos, evaluando las métricas de desempeño y los tiempos optimizados en diversas ejecuciones.

En los siguientes apartados se describen las tres primeras fases de la metodología del proyecto. La ejecución del programa y el análisis de los resultados, se desarrollarán a lo largo del apartado de caso de estudio y resultados.

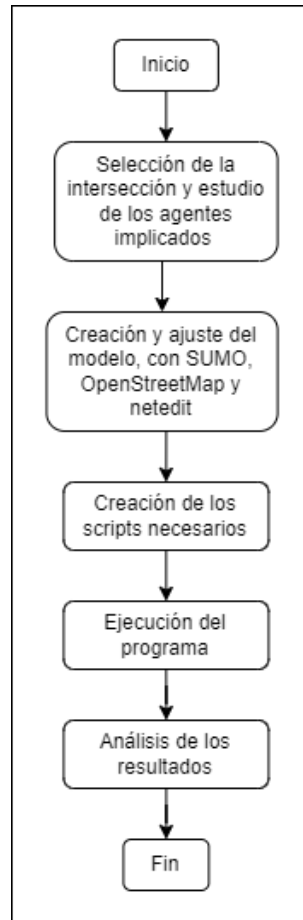


Figura 21: Metodología empleada en la realización del proyecto.

#### 4.1. Selección de la intersección y estudio de los agentes implicados

Al primer paso de este apartado se basa en elegir y representar una intersección. Para lograr una representación precisa y efectiva del tráfico en el entorno simulado, es esencial seleccionar una intersección que cumpla con ciertos criterios clave.

En primer lugar, se deben considerar los niveles de congestión y tránsito vehicular actuales. Además, la ubicación estratégica de intersección también debe ser tenida en cuenta. Factores como la proximidad a instituciones educativas, centros médicos o centros de eventos, son aspectos relevantes que considerar.

En este trabajo, se han considerado tres elementos clave para la optimización vehicular de una intersección: los semáforos, los coches y las cámaras de tráfico, que se plantean como una futura adición al sistema. Para la realización de este proyecto no se han tenido en cuenta a los peatones. A continuación, se describen cada uno de estos elementos con detalle [Figura 22]:

- **Semáforos:** Es importante comprender las fases de los semáforos y su coordinación para lograr un mejor funcionamiento en el cruce. Cada semáforo atra-

viesa diferentes fases que determinan cuándo se permite el paso a los diferentes carriles. Además, se debe tener en cuenta que en este proyecto el tiempo en “amarillo” o “ámbar” del semáforo es fijo, es decir, siempre durará 3 segundos. Los aspectos más relevantes de los semáforos son:

- **Fases de los semáforos:** Los semáforos funcionan mediante un ciclo de tiempo dividido en fases, donde cada fase corresponde a un conjunto específico de movimientos permitidos en la intersección. Por ejemplo, en una intersección simple, las fases pueden incluir el paso de los vehículos en una dirección u otra, el tiempo de espera o la transición a la fase de “ámbar” antes de iniciar un nuevo ciclo. La configuración de las fases dependerá de las necesidades de la intersección considerando como ciclo básico verde-ámbar-rojo. Cada fase tiene una duración asignada [96].
- **Coordinación de los semáforos:** La coordinación adecuada de los semáforos en una intersección es esencial para garantizar una mejor fluidez del tráfico. Esto implica establecer una secuencia lógica de fases que permita un movimiento continuo y seguro de los vehículos a través de una intersección. La coordinación se logra ajustando la duración de las fases de cada semáforo de manera que se minimice el tiempo de espera y se mejore la eficiencia del cruce en su conjunto. Es importante tener en cuenta que la coordinación debe considerar no solo las condiciones actuales de tráfico en la intersección, sino también las proyecciones y las tendencias históricas de tráfico.
- **Coches:** Los coches representan los vehículos que circulan por la intersección. Cada coche tiene una serie de atributos, como la velocidad, la aceleración, posición y destino. La intersección entre los coches y los semáforos permite determinar los patrones de tráfico y la eficiencia del cruce. Durante la simulación mediante SUMO se han tenido en cuenta los comportamientos individuales de los coches, así como las intersecciones entre ellos y con los semáforos, con el fin de evaluar el impacto de las estrategias de optimización propuestas.
- **Cámaras:** En el marco de una instalación real de este proyecto se plantea la utilización de cámaras como un elemento adicional de monitoreo y control de tráfico. Estas cámaras permitirán la captura de datos en tiempo real sobre el flujo vehicular, las condiciones de tráfico y el comportamiento de los conductores. La información recopilada por las cámaras podrá ser utilizada para ajustar y mejorar la configuración de los semáforos. Además, proporcionará datos para futuros estudios de análisis y optimización de tráfico. La implantación de este sistema se realizaría mediante el uso de YOLO (*You Only Look Once*). En el futuro, el procedimiento propuesto para la inserción de cámaras utilizando YOLO implicaría la preparación de datos de entrenamiento, el entrenamiento del modelo, la implementación de cámaras en la inserción, el seguimiento y el análisis a tiempo real. Posteriormente se procedería a la integración de los resultados con el algoritmo PSO ya implantado en este trabajo [55].

La selección de una intersección adecuada y el estudio de los agentes implicados

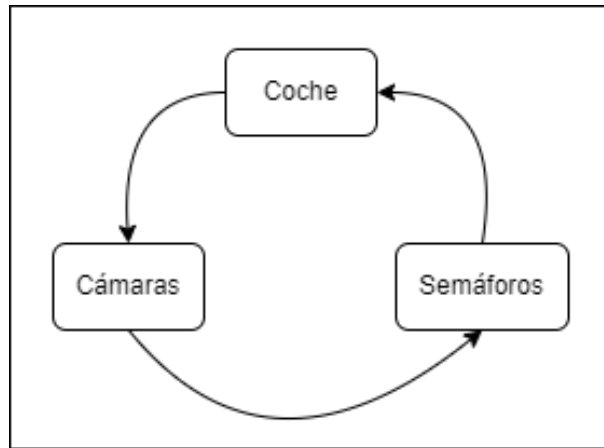


Figura 22: Agentes implicados en esta metodología.

son partes fundamentales de la metodología empleada en este proyecto de optimización vehicular. Además, en este apartado se han desarrollado los elementos clave para la optimización vehicular en una intersección.

## 4.2. Creación y ajuste de modelo, con SUMO, OpenStreet-Map y netedit

En este apartado se aborda la generación del modelo de la intersección seleccionada mediante la utilización del paquete de SUMO. Para ello, se emplean herramientas como OpenStreetMap y netedit. En la Figura 14 se observa un ejemplo de creación de un modelo utilizando estas herramientas en el contexto de la ciudad de Málaga.

En primer lugar, se obtienen los datos necesarios de OpenStreetMap, una plataforma colaborativa que ofrece datos geoespaciales de manera libre y abierta. En esta plataforma se selecciona el área de interés para el estudio y se accede a la configuración correspondiente. OpenStreetMap proporciona una amplia gama de información geoespacial configurable, incluyendo la geometría de las vías, los nombres de las calles, los límites de velocidad, las ubicaciones de los semáforos y las paradas de transporte público, entre otros. Es importante destacar que, aunque OpenStreetMap proporciona una gran cantidad de información, puede ser necesario editar y refinar los datos obtenidos, adaptándolos a las necesidades del estudio [37].

En el caso de que sea necesario, se procede a editar y refinar los datos obtenidos empleando la herramienta netedit. Es una herramienta gráfica integrada en SUMO que permite la edición de modelos de simulaciones de tráfico. Con esta herramienta, es posible manipular los elementos de la red vial, como carreteras, intersecciones, carriles, semáforos, paradas de transporte público y zonas peatonales. Netedit es una herramienta muy versátil que permite definir, por ejemplo, la geometría exacta de carriles, velocidades máximas o los tipos de vehículos permitidos. Todo esto se realiza a través de un visor gráfico de la red vial [58].

A continuación, se procede a la configuración de la simulación en SUMO, que

emplea los ficheros XML obtenidos mediante OpenStreetMap y netedit. SUMO permite visualizar la simulación y ejecutarla con los cambios que precise el modelo de estudio. Por ejemplo, se pueden añadir vehículos con diferentes atributos, establecer rutas predefinidas, simular el transporte público o redes de trenes [103]. La simulación obtenida se almacena en diversos ficheros XML editables para su uso en el futuro.

Al combinar los datos de OpenStreetMap con las herramientas SUMO y netedit, se logra una representación realista y detallada de la intersección en el entorno de simulación. Esta generación del modelo proporciona una base sólida para evaluar y optimizar el comportamiento del tráfico, así como para implementar estrategias de control y optimización en la intersección seleccionada.

### 4.3. Creación de los *scripts* necesarios

En este apartado se desarrolla el método de optimización del ciclo semafórico de la intersección seleccionada. Para ello, se utilizan los mapas generados previamente, interactuando con ellos mediante la API de TraCI. La misma permite establecer una comunicación TCP con SUMO, siguiendo una arquitectura cliente-servidor [Figura 23]. En este caso, SUMO actúa como servidor, mientras que el *script* desarrollado actúa como cliente, enviando las solicitudes necesarias para interactuar con el simulador. Para una correcta configuración con SUMO, es necesario utilizar el fichero de configuración “osm.sumocfg” y el fichero de rutas “osm.rou.xml” [88].

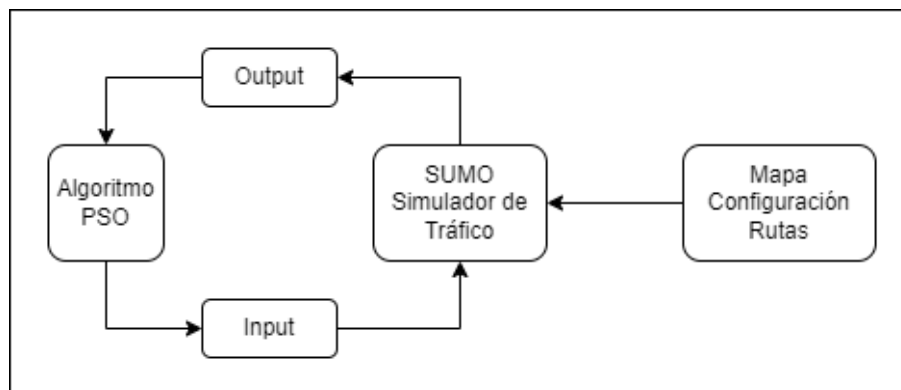


Figura 23: Flujo de trabajo con PSO + SUMO.

El objetivo principal es optimizar el rendimiento del tráfico en la intersección, reduciendo el tiempo de espera de los vehículos, el tiempo de viaje y minimizando la congestión. Para lograr esto, se empleó el algoritmo de optimización PSO, utilizando la biblioteca “pyswarm”, aunque se podría emplear cualquier otro método de optimización, como los algoritmos genéticos desarrollados anteriormente. En este caso, se establecen los siguientes parámetros para el uso del algoritmo [80]:

- **Tiempo mínimo de la fase:** Representa el límite mínimo permitido para el tiempo de duración de un semáforo. Establecer un límite inferior garantiza que

los tiempos de semáforo generados durante la optimización no sean demasiado bajos y no causen problemas en el flujo vehicular. El mínimo empleado ha sido 5 segundos.

- **Tiempo máximo de la fase:** Representa el límite máximo permitido para el tiempo de duración de un semáforo. Establecer un límite superior evita que los tiempos de semáforo generados durante la optimización sean excesivamente altos, lo que podría resultar en tiempos de espera prolongados para los conductores. Se ha fijado en 60 segundos.
- **Tamaño del enjambre:** Determina el tamaño del enjambre, es decir, el número de partículas o soluciones candidatas. Aumentar este valor alarga el tiempo de ejecución del algoritmo. Se han empleado 50 partículas.
- **Número máximo de iteraciones:** Establece el número máximo de iteraciones que el algoritmo realiza antes de finalizar. Es necesario mencionar, que el algoritmo comienza contando en 0. Se ha inicializado este valor a 99, con el fin de que haga 100 iteraciones.
- **Coefficiente de inercia:** Este coeficiente controla la influencia de la velocidad anterior de una partícula en su movimiento actual. Un valor de coeficiente de inercia alto favorece la exploración global del espacio de soluciones, mientras que un valor bajo favorece la explotación local. Se ha fijado un valor equilibrado de 0.8.
- **Coefficiente cognitivo:** Este coeficiente controla la influencia de la mejor solución personal de una partícula en su movimiento actual. Un valor alto de coeficiente cognitivo enfatiza la experiencia personal de la partícula en la búsqueda de soluciones óptimas. Se ha seleccionado un valor de 1.0.
- **Coefficiente social:** Este coeficiente controla la influencia de la mejor solución global (mejor posición de todas las partículas) en el movimiento actual de una partícula. Un valor alto de coeficiente social enfatiza la colaboración y el aprendizaje de las soluciones de otras partículas en la búsqueda de soluciones óptimas. Se ha empleado un valor de 1.0.

En la “función objetivo” empleada por el algoritmo PSO se crean los vehículos en todas las rutas con una velocidad inicial de 0 m/s. Se realiza una simulación en 1000 pasos con el fin de obtener una visión global la intersección. Posteriormente, se obtienen los valores de los vehículos en cada paso y se procesan con los valores anteriores. Se considera que hay congestión cuando la velocidad es inferior a 5 m/s (18 km/h). Una vez finalizados los 1000 pasos, se emplea una operación matemática con el objetivo de que su resultado sea lo más cercano a cero posible, es decir, el resultado más óptimo entre todas las posibilidades analizadas [91]. Esta operación matemática se expresa mediante la siguiente métrica de desempeño:

$$performance\_metric = \frac{total\_waiting\_time + total\_travel\_time}{total\_congestion + 1}$$

## Optimización de la movilidad a partir del manejo de datos de flujo de tráfico

---

Esta función tiene en cuenta el tiempo de espera de los vehículos en la intersección (*total\_waiting\_time*) y lo combina con el tiempo de viaje total (*total\_travel\_time*), es decir, desde que el vehículo aparece en la intersección hasta que desaparece de la escena. Mediante esta técnica, se obtiene el valor que cuantifica el rendimiento del tráfico. Por último, este valor se divide entre la congestión total (*total\_congestion*) +1. El objetivo de dividir entre la congestión total +1 es estandarizar los resultados logrando que sean más representativos. Se suma +1 para evitar divisiones entre 0.

Los resultados obtenidos por este *script* incluyen los tiempos óptimos y la métrica de desempeño (*performance\_metric*) de los semáforos, que se almacenan en un fichero TXT. También se registran todos los valores *performance\_metric* calculados durante la ejecución en un archivo CSV, y se genera una gráfica que muestra la evolución de los valores de *performance\_metric* a lo largo de la ejecución.

Para finalizar, se automatizó la ejecución del código con el fin de obtener 10 resultados que permitan comparar los resultados y validar manualmente la eficiencia del código en busca de su optimización.

## 5. Caso de estudio

En este caso de estudio, se aplica la metodología desarrollada a una intersección real, específicamente en la intersección entre el Paseo de San Vicente (N-630) con la Avenida de los Maristas y con la Calle Espejo, en Salamanca [Figura 24]. Esta intersección representa un desafío en términos de optimización del tráfico debido a la alta afluencia de vehículos y la necesidad de garantizar un flujo eficiente y seguro. A lo largo del caso de estudio, se implementarán las técnicas y herramientas descritas anteriormente para mejorar la eficiencia y reducir los tiempos de espera en la intersección.

### 5.1. Selección de la intersección y estudio de los agentes implicados

La intersección seleccionada para este estudio se encuentra en una ubicación estratégica cerca del centro histórico de la ciudad, así como de dos hospitales, colegios y la zona universitaria del Campus Unamuno. Además, en sus proximidades se encuentran importantes edificios como el I+D+I de la Universidad de Salamanca y el Colegio Arzobispo Fonseca. Debido a su ubicación y a la presencia de instituciones y áreas de mucho tránsito, esta intersección experimenta un alto volumen de tráfico, especialmente durante las horas punta de entrada y salida al trabajo y a las clases.



Figura 24: Vista aérea de la intersección seleccionada.

La intersección está compuesta por tres calles [Figura 24] que tienen un límite

## Optimización de la movilidad a partir del manejo de datos de flujo de tráfico

---

máximo de velocidad de 30 km/h. En esta configuración, la intersección cuenta con un total de seis semáforos que regulan el tránsito vehicular en cada una de las vías. Las tres calles implicadas en la intersección son las siguientes:

- **Paseo de San Vicente:** Consta de dos carriles que bajan hacia la zona de hospitales y tres carriles que se dirigen hacia el Campo de San Francisco. En el centro del Paseo de San Vicente se encuentra un carril de espera semaforizado que permite el tránsito regulado hacia la Calle Espejo. Además, también es posible acceder a la Calle Espejo a través del carril de la derecha de Paseo de San Vicente (Dirección Campo de San Francisco).
- **Avenida de los Maristas:** Se compone de cuatro carriles que desembocan en la intersección. Los dos carriles de la izquierda tienen sentido obligatorio hacia Paseo de San Vicente (Dirección zona de hospitales). El tercer carril permite continuar por Calle Espejo o, junto con el carril contiguo, continuar por el Paseo de San Vicente (Dirección Campo de San Francisco).
- **Calle Espejo:** Contiene dos carriles de único sentido para abandonar la intersección desde cualquiera de las dos calles que acceden a ella.

Dependiendo de la posición del vehículo en la intersección existen siete rutas posibles que determinan la trayectoria a seguir. Estas rutas se definen según la combinación de calles por las que el vehículo puede transitar, y la adecuada coordinación de los semáforos es fundamental para permitir y movimiento fluido y seguro en todas ellas [Figura 28].

### 5.2. Creación y ajuste del modelo, con SUMO, OpenStreetMap y netedit

Inicialmente, se ejecutó OpenStreetMap con el fin de seleccionar y obtener el modelo de la intersección mediante su descarga. Se configuró OpenStreetMap para obtener únicamente los datos relevantes para la intersección, como semáforos, vehículos y carreteras [Figura 25].

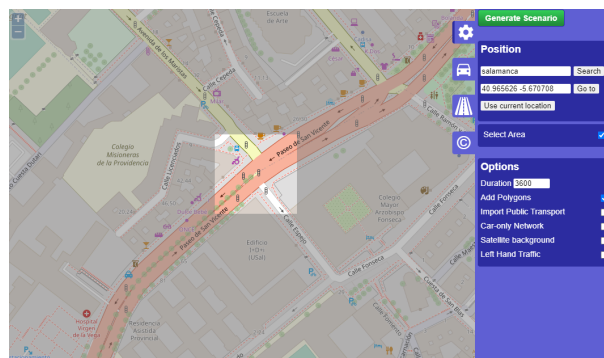


Figura 25: Selección de la intersección con OpenStreetMap.

Una vez obtenido el modelo inicial, se procedió a ajustarlo, empleando la herramienta netedit. Esta herramienta permitió realizar modificaciones en los semáforos existentes en la intersección. En el cruce en cuestión, se identificaron un total de seis semáforos que se distribuyeron en cuatro grupos semafóricos. Se ha considerado como grupo semafórico a uno o más semáforos que actúan de manera coordinada en la regulación del tráfico en una intersección. Para una mejor organización y coordinación se agruparon según lo expuesto en la Tabla 1. Además en la Figura 26 se observan los cuatro grupos semafóricos representados con un símbolo de semáforo.

Semáforo	Ubicación	Grupo semafórico
Semáforo 1	Semáforo de Paseo de San Vicente en dirección a la zona de hospitales, entrando en la intersección.	Grupo 1
Semáforo 2	Semáforo Avenida de los Maristas, antes de entrar en la intersección.	Grupo 1
Semáforo 3	Paseo de San Vicente en dirección a la zona hospitales, saliendo de la intersección.	Grupo 2
Semáforo 4	Paseo de San Vicente en dirección al Campo de San Francisco, entrando en la intersección.	Grupo 3
Semáforo 5	Semáforo situado en el carril central de espera del Paseo de San Vicente. Regula el paso a Calle Espejo.	Grupo 3
Semáforo 6	Se encuentra a la entrada de Calle Espejo, saliendo de la intersección.	Grupo 4

Tabla 1: Semáforos y su división en grupos semafóricos.

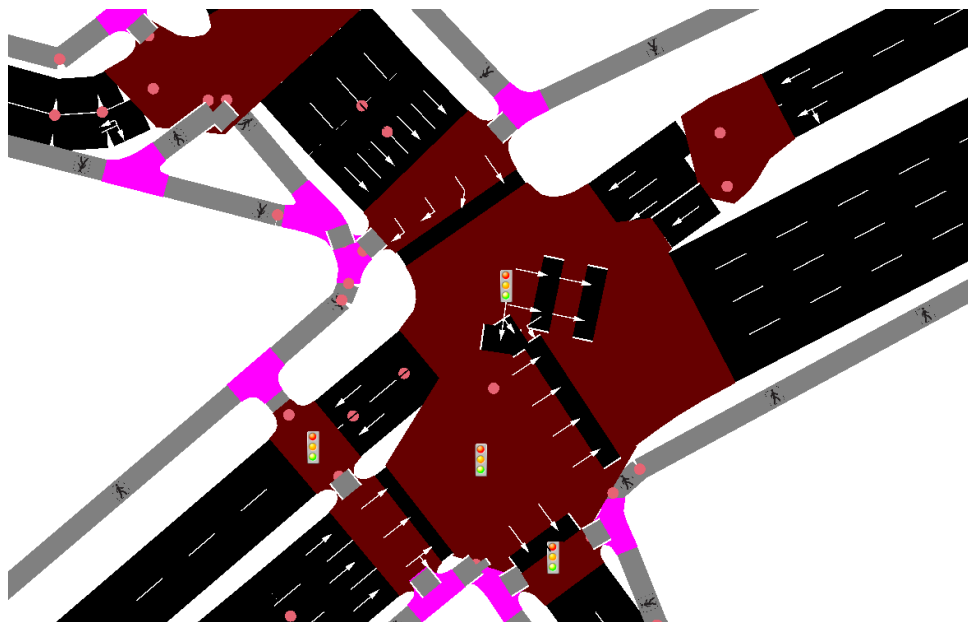


Figura 26: Diseño de los grupos semafóricos en netedit.

Como se ha mencionado en la metodología, un ciclo semafórico completo se divide

en una secuencia ordenada de fases. Cada fase representa un estado específico de los semáforos, indicando qué carriles tienen luz verde, amarilla o roja en un momento dado. Mediante código XML se define el comportamiento inicial de los semáforos en la intersección a través de la especificación de las diferentes fases. Este código viene dado por defecto al obtener los datos de OpenStreetMap y modificarlos con `netedit`.

En el siguiente código XML, se definen cuatro grupos semafóricos identificados por los elementos “<tlLogic>” con sus respectivos identificadores únicos (atributo “id”). Los cuatro grupos semafóricos se representan en el código ordenados según la numeración aportada en la Tabla 1.

```
<tlLogic id="458496572" type="static" programID="0" offset="0">
  <phase duration="42" state="GGrrrrr"/>
  <phase duration="3" state="yyrrrrr"/>
  <phase duration="42" state="rrGGGGG"/>
  <phase duration="3" state="rryyyyy"/>
</tlLogic>
<tlLogic id="1373663392" type="static" programID="0" offset="0">
  <phase duration="82" state="GG"/>
  <phase duration="3" state="yy"/>
  <phase duration="5" state="rr"/>
</tlLogic>
<tlLogic id="1373663389" type="static" programID="0" offset="0">
  <phase duration="42" state="rGGGGG"/>
  <phase duration="3" state="ryyyyy"/>
  <phase duration="42" state="GGrrrrr"/>
  <phase duration="3" state="yyrrrrr"/>
</tlLogic>
<tlLogic id="1373663387" type="actuated" programID="0" offset="0">
  <phase duration="82" state="GG"/>
  <phase duration="3" state="yy"/>
  <phase duration="5" state="rr"/>
</tlLogic>
```

Los estados de los semáforos se identifican mediante las letras “G” para luz verde, “y” para luz amarilla y “r” para luz roja. La duración de cada fase se especifica con el atributo “duration”. En el código XML anterior se representa una coordinación adecuada de los colores de los semáforos en la intersección. En el caso del primer y del tercer grupo semafórico, existen cuatro fases que coordinan cada uno dos semáforos a la vez, esto explica que el tiempo asignado para las diferentes fases sea el mismo, a excepción del ámbar que siempre son 3 segundos.

En el atributo “state” se definen los colores de los semáforos para la fase determinada. Este atributo indica que carriles tienen luz verde, amarilla o roja. En la Figura 27 se numeran los diferentes carriles según su orden establecido en el código XML anterior con el fin de facilitar el entendimiento de las diferentes combinaciones de fases.

Como se ha mencionado anteriormente, el código XML presentado aporta una configuración inicial que se modificará posteriormente durante la ejecución del *script* de Python. Esta modificación es necesaria para que el algoritmo PSO pueda probar las posibles soluciones y encontrar los tiempos óptimos. Además, en este caso de estudio se han configurado los grupos semafóricos para que ciertas fases tengan obligatoriamente la misma duración evitando bloqueos en el tráfico. Esto ocurre en la primera y tercera fase de los grupos semafóricos 1 y 3.

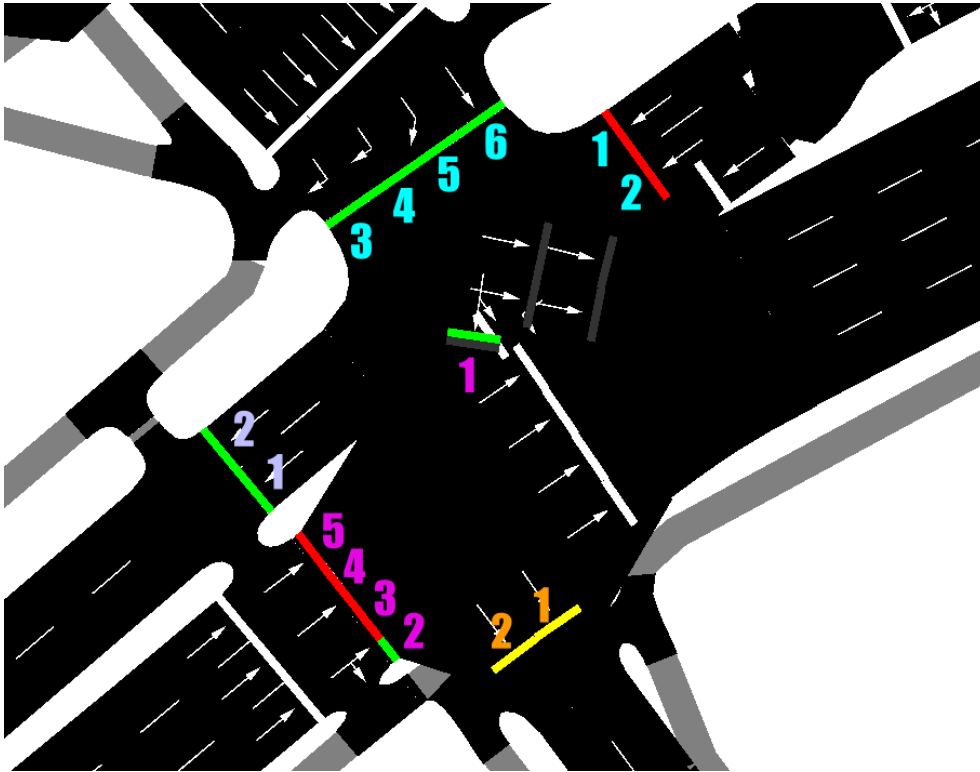


Figura 27: Número de carril según el grupo semafórico.

Una vez configurados los grupos semafóricos y sus fases, se procedió a definir las rutas disponibles para los vehículos en la intersección. Esto se realizó empleando la interfaz gráfica de la herramienta netedit. El resultado es un fichero XML en el que se definen las siete rutas existentes mediante los identificadores de los tramos que las componen. En la Tabla 2 se exponen todas las rutas clasificadas según su entrada y salida de la intersección.

Ruta	Entrada	Salida
Ruta 1	Avenida de los Maristas.	Paseo de San Vicente (Dirección hospitales).
Ruta 2	Avenida de los Maristas.	Calle Espejo.
Ruta 3	Avenida de los Maristas.	Paseo de San Vicente (Dirección Campo de San Francisco).
Ruta 4	Paseo de San Vicente (Dirección Campo de San Francisco).	Calle Espejo.
Ruta 5	Paseo de San Vicente (Dirección Campo de San Francisco).	Paseo de San Vicente (Dirección Campo de San Francisco).
Ruta 6	Paseo de San Vicente (Dirección zona de hospitales).	Paseo de San Vicente (Dirección hospitales).
Ruta 7	Paseo de San Vicente (Dirección zona de hospitales).	Calle Espejo.

Tabla 2: Rutas de los vehículos en la intersección.

En la Figura 28 se presentan todas las posibles rutas previamente definidas, las cuales se muestran en color amarillo. Además, se representa el diseño del mapa utilizando un código de colores específico de netedit. En este código, los tramos de la carretera se muestran en color verde, las intersecciones entre los tramos se destacan en granate y áreas peatonales, que no son relevantes en este caso, se representan en color fucsia. De esta manera, se obtiene una representación visual clara y distintiva de los diferentes elementos de las rutas.

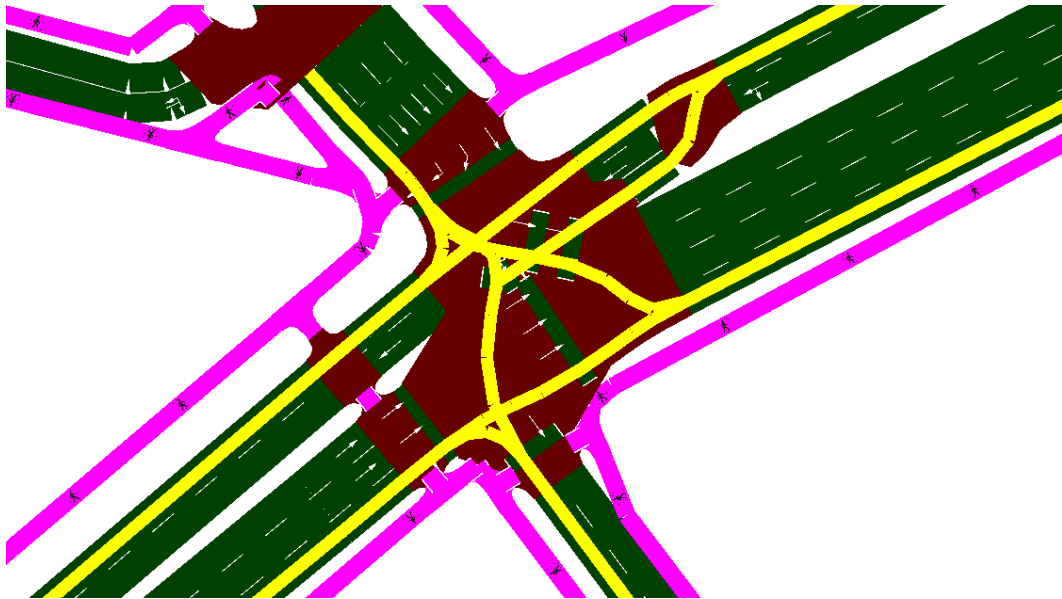


Figura 28: Configuración de las rutas en netedit.

Para validar visualmente el modelo de la intersección con la configuración de los semáforos y las rutas incorporadas, se utilizó la herramienta SUMO. En esta fase, se comparó el modelo creado con los datos reales previamente analizados para asegurar que la configuración se aplicara correctamente. La Figura 29 muestra el resultado final de la simulación gráfica de la intersección empleando SUMO.

Una vez obtenido el modelo de simulación final, se incorporó el archivo de configuración de la simulación y el archivo de rutas al código desarrollado. Es necesario mencionar que en el archivo de configuración están incluidas las configuraciones de los grupos semafóricos. Luego, se ejecutó el *script* que realizó 10 ejecuciones [Figura 30] del programa de optimización, obteniendo los resultados del proyecto. De cada ejecución, se obtuvieron los mejores tiempos en segundos para las fases de todos los semáforos calculados con la métrica de desempeño (*performance\_metric*), se generó un archivo CSV con todos los valores de *performance\_metric* y se creó una gráfica que muestra la evolución de esta métrica a lo largo de las iteraciones [Figuras 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41].

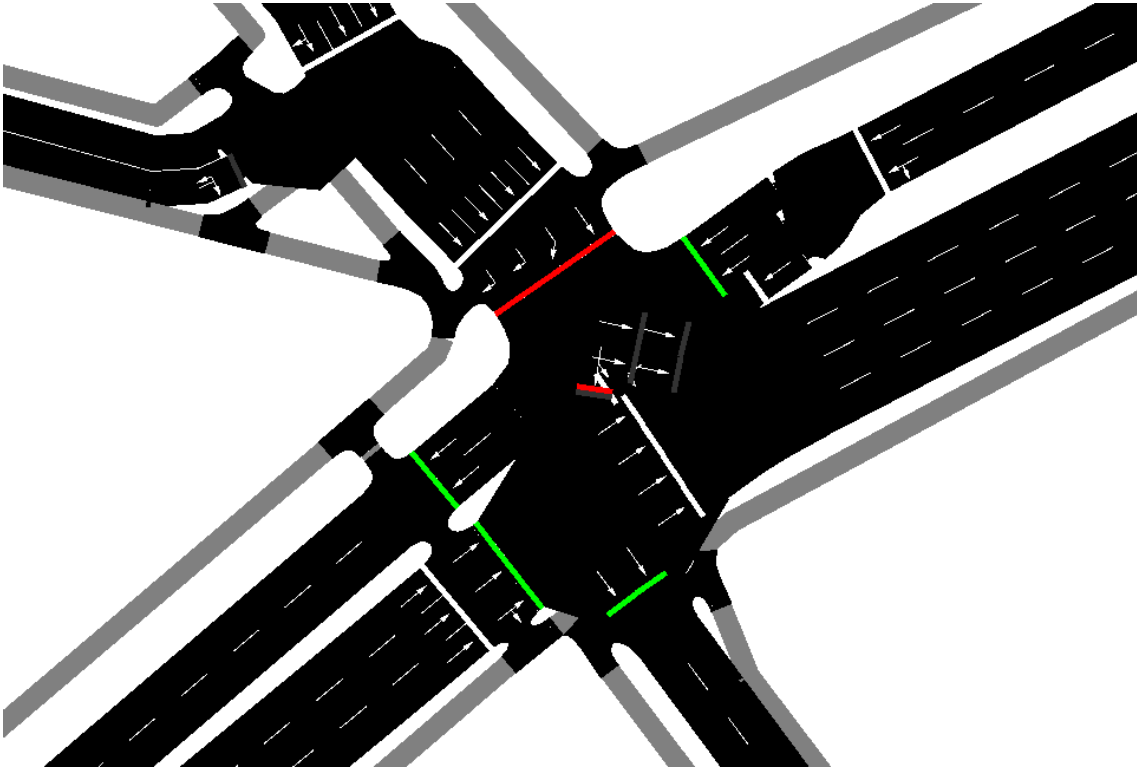


Figura 29: Resultado final de la simulación en SUMO.

```
empieza ejecucion 3

Step #5000000.00Stopping search: maximum iterations reached --> 99ACT 0 BUF 0)
Los resultados se han almacenado en el archivo 'salida/resultados.txt'.
Los valores de performance_metric se han guardado en el archivo CSV.
Gráfica guardada como 'salida/performance_metrics_plot6_22_6_6.png'
(0ms ?*RT. ?UPS, TraCI: 804ms, vehicles TOT 175000 ACT 0 BUF 0)
TERMINA ejecucion 3

empieza ejecucion 4

Step #5000000.00Stopping search: maximum iterations reached --> 99ACT 0 BUF 0)
Los resultados se han almacenado en el archivo 'salida/resultados.txt'.
Los valores de performance_metric se han guardado en el archivo CSV.
Gráfica guardada como 'salida/performance_metrics_plot6_23_11_58.png'
(0ms ?*RT. ?UPS, TraCI: 313ms, vehicles TOT 175000 ACT 0 BUF 0)
TERMINA ejecucion 4
```

Figura 30: Ejecución del programa de optimización.

## 6. Resultados y discusión

El objetivo principal de este trabajo es realizar la optimización de la gestión semafórica de la intersección Paseo de San Vicente – Avenida de los Maristas – Calle Espejo, de la ciudad de Salamanca, mediante la optimización con el algoritmo PSO, con el fin de mejorar la eficiencia del flujo vehicular y reducir la congestión de dicha intersección. Para llevar a cabo esta optimización, se establecieron límites inferiores y superiores para la duración de las fases “verde” y “rojo” en cada grupo semafórico. En este caso, se fijó un tiempo mínimo de 5 segundos y un tiempo máximo de 60 segundos. Estos límites fueron determinados empleando el simulador SUMO considerando la seguridad vial, la fluidez del tráfico y las restricciones establecidas.

El algoritmo PSO se configuró para realizar 100 iteraciones con un tamaño de enjambre de 50 partículas, lo que resultó en un total de 5.000 intentos de búsqueda para encontrar la configuración óptima. En cada uno de estos intentos se planteó una configuración semafórica y se introdujeron 35 vehículos en la intersección, generando un total de 5.000 configuraciones diferentes y 175.000 vehículos en cada simulación. Estos vehículos representaron el flujo de tráfico en la intersección y permitieron evaluar el rendimiento de todos los posibles tiempos de los semáforos. Se realizaron 10 ejecuciones de este algoritmo con el fin de obtener una variedad significativa de resultados que permita validar los tiempos obtenidos.

La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos mediante las 10 ejecuciones del programa. En ella se observan los tiempos de duración de las fases “verde” y “rojo” en segundos para cada grupo semafórico (GS, en la Tabla 3), junto con el valor *performance\_metric*. Es importante destacar que para los grupos semafóricos 1 y 3, solo se obtiene un tiempo de duración de la fase “verde” o “rojo”, respectivamente. Esto se debe a que, en estos grupos semafóricos, durante el mismo tiempo, ciertos carriles están en verde mientras que otros están en rojo, y viceversa. Por otro lado, en los grupos semafóricos 2 y 4, se obtuvieron tiempos diferentes para las fases “verde” y “rojo”, ya que estos grupos semafóricos solo coordinan, cada uno, un único semáforo para dos carriles.

Para analizar los resultados de manera visual, se presenta el siguiente gráfico de dispersión [Figura 31]. Este gráfico muestra cómo se distribuyen los tiempos de las diferentes fases de los semáforos en cada ejecución y cómo se acercan a una distribución uniforme, lo que indica una buena optimización del modelo logrando siempre resultados más o menos similares. Como se observa en la gráfica de dispersión [Figura 31] los resultados para cada grupo semafórico (GS) [Tabla 3] son los siguientes:

- **GS 1:** Se observa una variabilidad de los tiempos de duración. Este tiempo corresponde a el tiempo establecido para la duración de ambas fases complementarias. Los valores son generalmente bajos, en torno a 5-9 segundos, a excepción de un valor de 51 segundos que se aleja de la tendencia general. Además, este valor coincide con la *performance\_metric* más alta por lo que se considera el valor menos eficiente, aunque se aceptaría como medición válida.

Iteración	GS 1	GS 2		GS 3	GS 4		<i>performance_metric</i>
	Verde	Verde	Rojo	Verde	Verde	Rojo	
1	51	40	25	48	18	5	64,28
2	5	60	5	51	60	5	59,47
3	5	59	18	60	56	5	61,452
4	7	14	5	14	57	8	59,031
5	5	60	7	41	52	5	60,161
6	5	43	5	57	60	10	59,834
7	7	60	8	52	20	5	60,387
8	5	56	21	60	28	5	61,456
9	9	54	7	18	58	5	60,19
10	5	40	5	48	60	5	59,552

Tabla 3: Tiempos óptimos obtenidos para los diferentes grupos semafóricos.

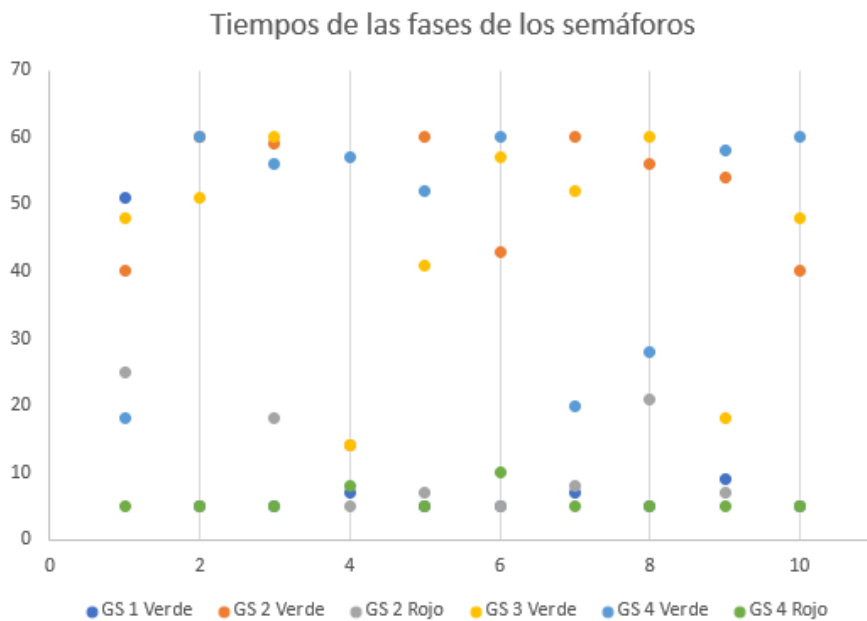


Figura 31: Gráfica de dispersión. Tiempos de las fases de los semáforos.

- **GS 2:** Los tiempos de duración de la fase “verde” rondan entre 40 y 60 segundos, a excepción de un valor de 14 que se sale del rango. Pese a que no sigue la tónica general, el valor de *performance\_metric* en esa ejecución es bueno, por lo que esa configuración de semáforos se considera válida. En lo que respecta a los tiempos de duración de la fase “rojo” se encuentran en un rango de 5-25 segundos predominando los valores por debajo de 10 segundos.
- **GS 3:** Se observa una variabilidad de los tiempos de duración. Este tiempo corresponde a el tiempo establecido para la duración de ambas fases comple-

mentarias. El rango se establece entre 14 y 60 segundos, situando el grueso de los valores por encima de 40 segundos.

- **GS 4:** Los tiempos de duración de la fase “verde”, en este caso, la distribución de los valores se encuentra entre 18 y 60 segundos distribuidos con 3 valores entorno a 20 y 7 valores entorno a 60. Los resultados de *performance\_metric* validan ambos grupos por lo que todas las configuraciones serían válidas. En cuanto a los valores de tiempo “rojo” el rango es más uniforme estando situado entre los 5 y los 10 segundos.

En conclusión, se observa que los resultados obtenidos tienen buenos datos de *performance\_metric*. Esto queda validado al observar que en 10 ejecuciones diferentes del algoritmo los valores de esta métrica están en el rango 59,031 a 64,280. La variabilidad en los tiempos de duración de las fases “verde” y “rojo” muestra que se han explorado diferentes opciones para encontrar la configuración óptima de los semáforos. Además, como se observa en las Figuras 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, la métrica de desempeño refleja una mejora consistente en el rendimiento del tráfico a lo largo de las iteraciones del algoritmo PSO. Estos resultados respaldan la efectividad de la optimización realizada.

Finalmente, como resultado del proyecto también se obtienen 10 gráficas que representan todos los resultados del valor *performance\_metric* de cada una de las 10 ejecuciones [Figuras 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41]. Tal y como se ha desarrollado en apartados anteriores, el algoritmo PSO emplea esta métrica para hallar la mejor opción de duración de las fases de los semáforos, es decir, el valor más bajo de *performance\_metric*. La mejor métrica de cada una de las iteraciones es la que se representó en la Tabla 3.

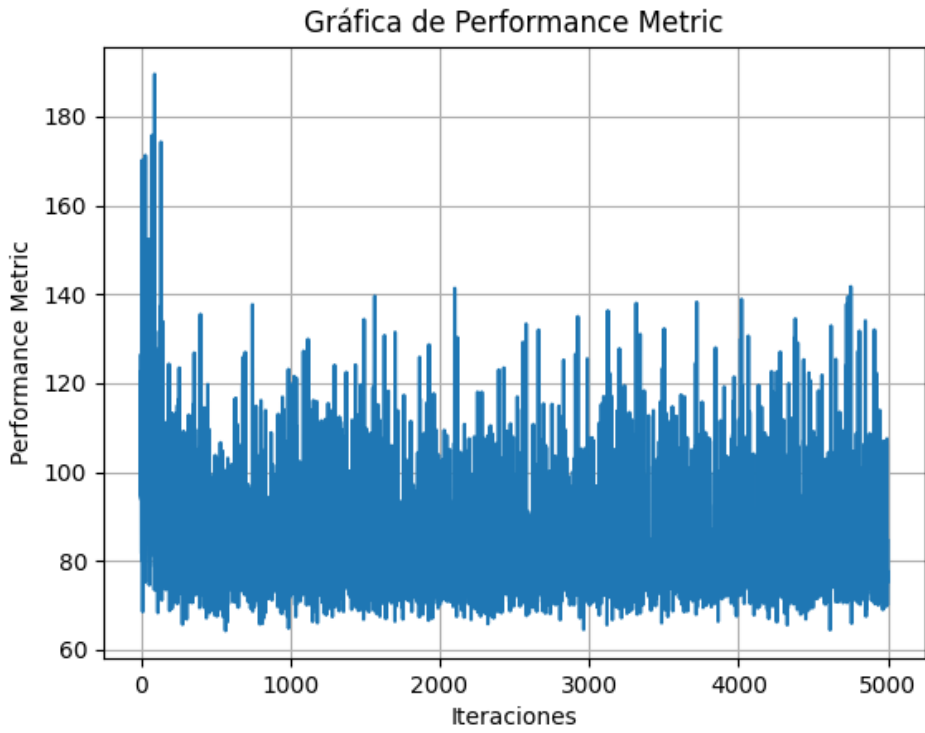


Figura 32: Valores de *performance\_metric* en la ejecución 1.

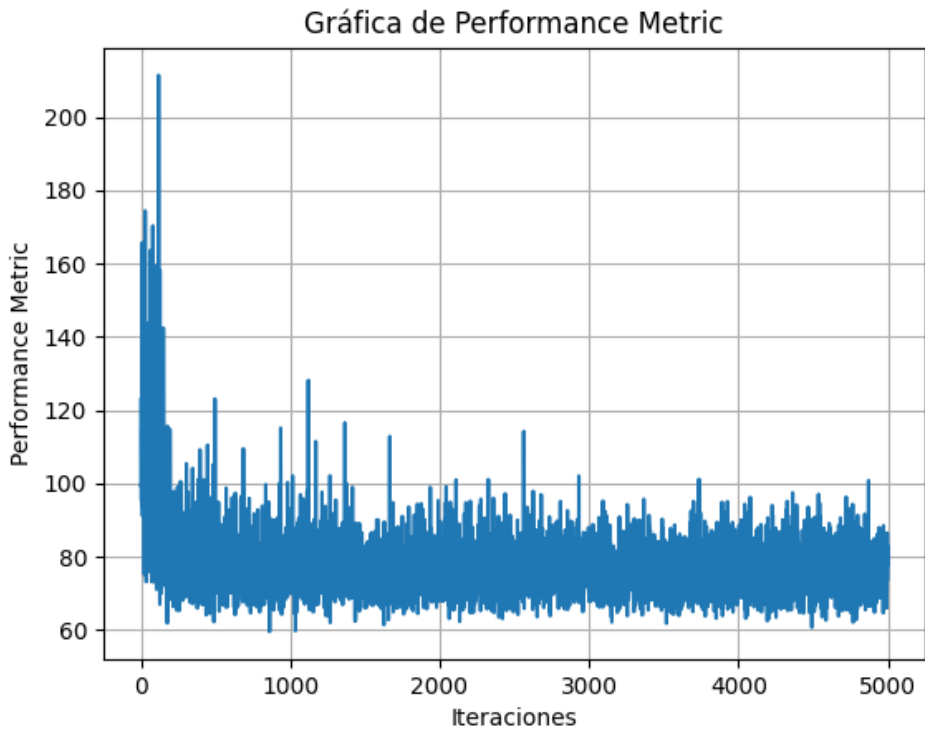


Figura 33: Valores de *performance\_metric* en la ejecución 2.

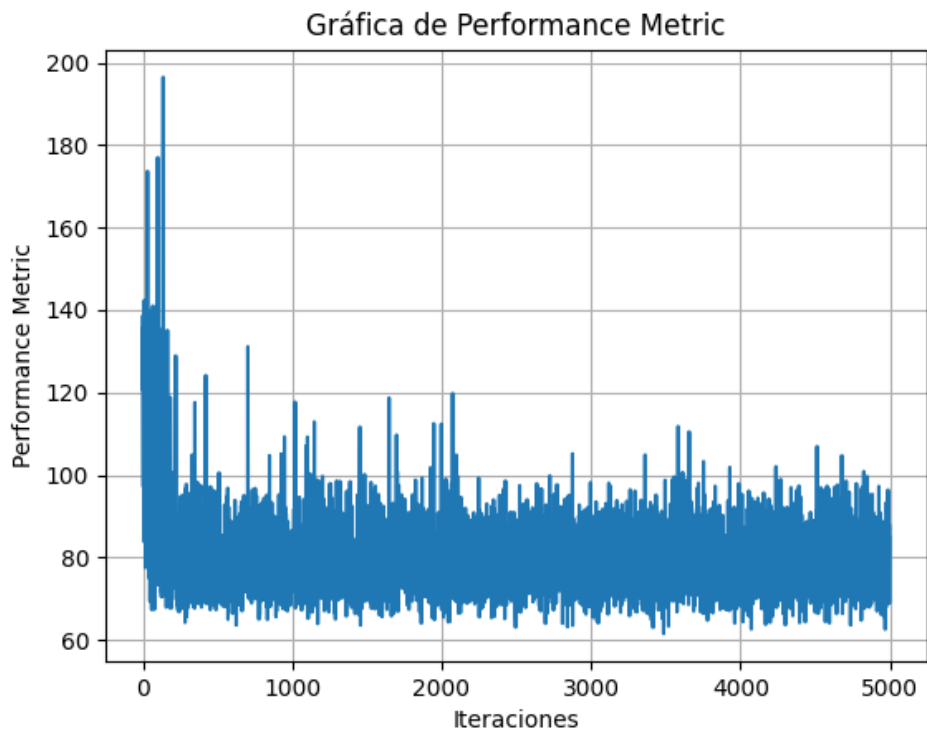


Figura 34: Valores de *performance\_metric* en la ejecución 3.

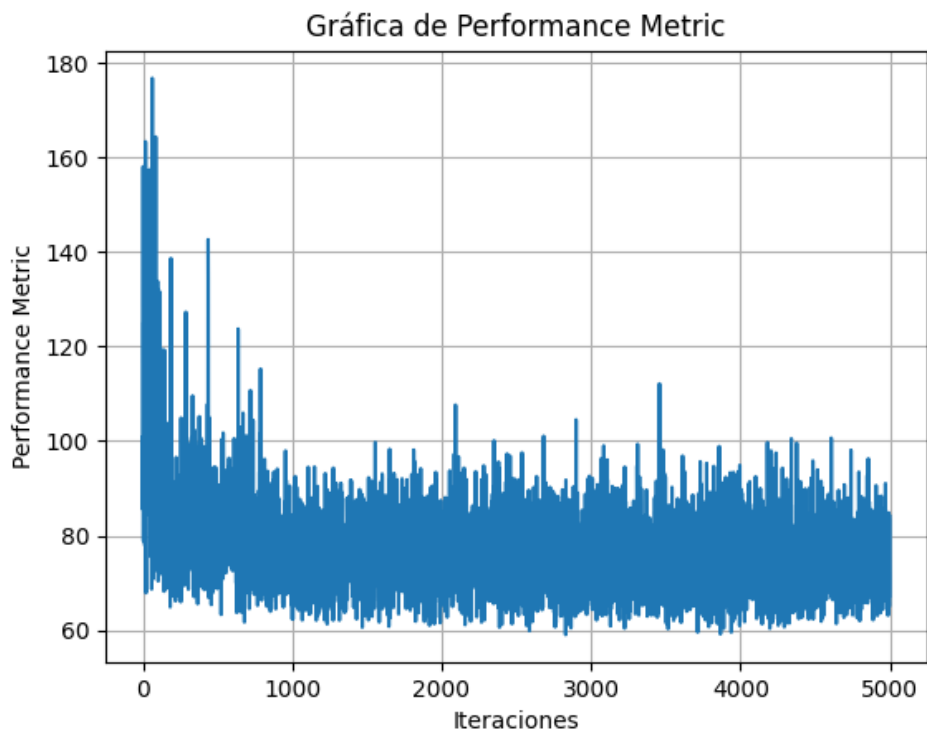


Figura 35: Valores de *performance\_metric* en la ejecución 4.

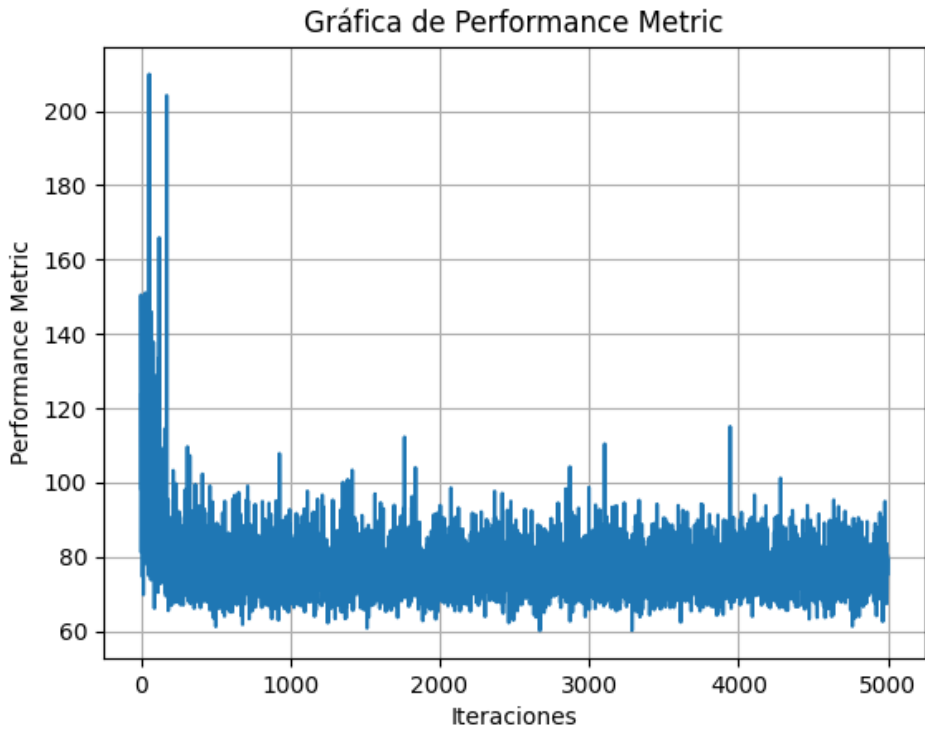


Figura 36: Valores de *performance\_metric* en la ejecución 5.

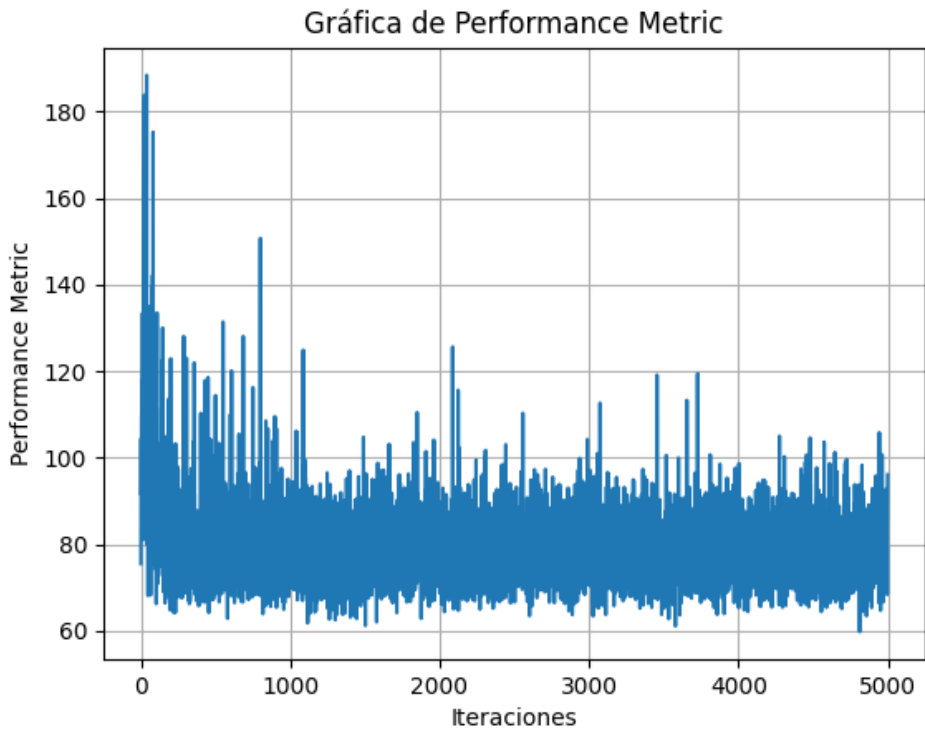


Figura 37: Valores de *performance\_metric* en la ejecución 6.

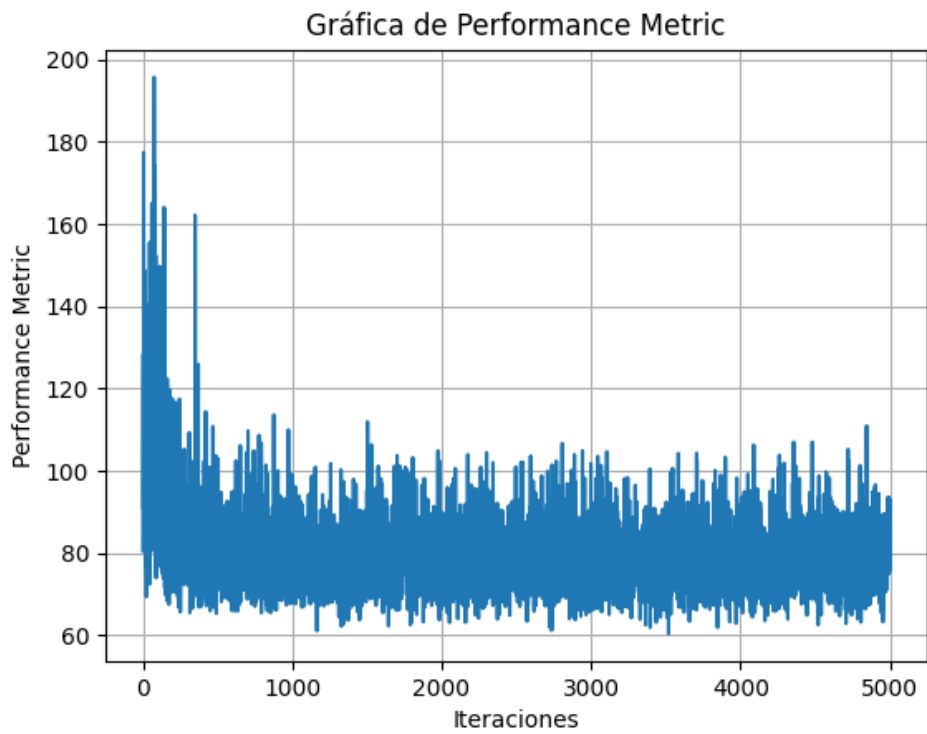


Figura 38: Valores de *performance\_metric* en la ejecución 7.

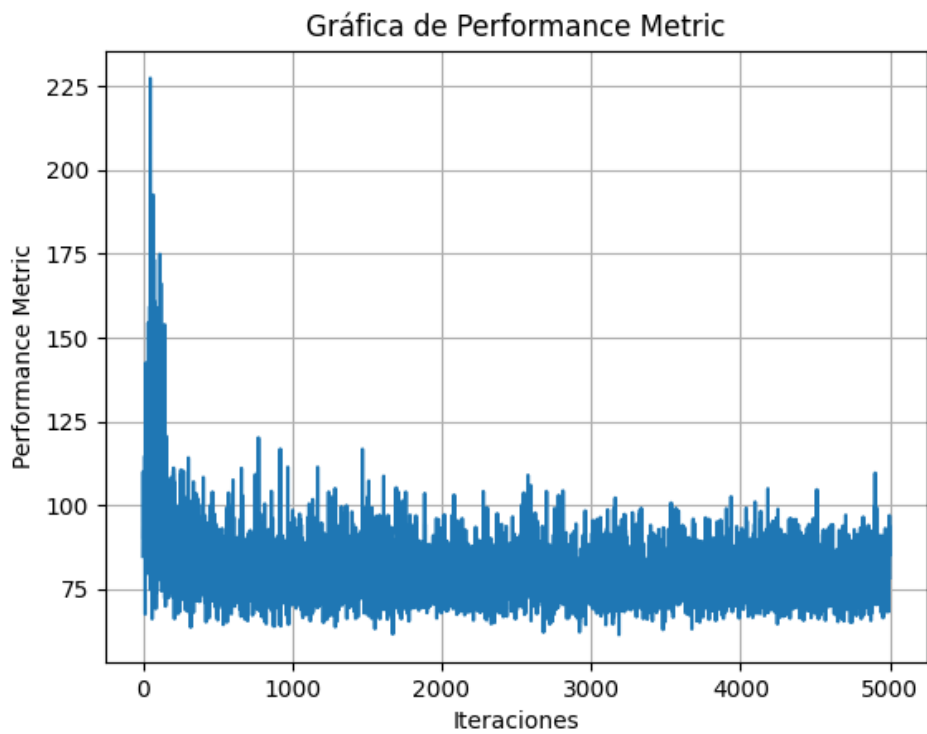


Figura 39: Valores de *performance\_metric* en la ejecución 8.

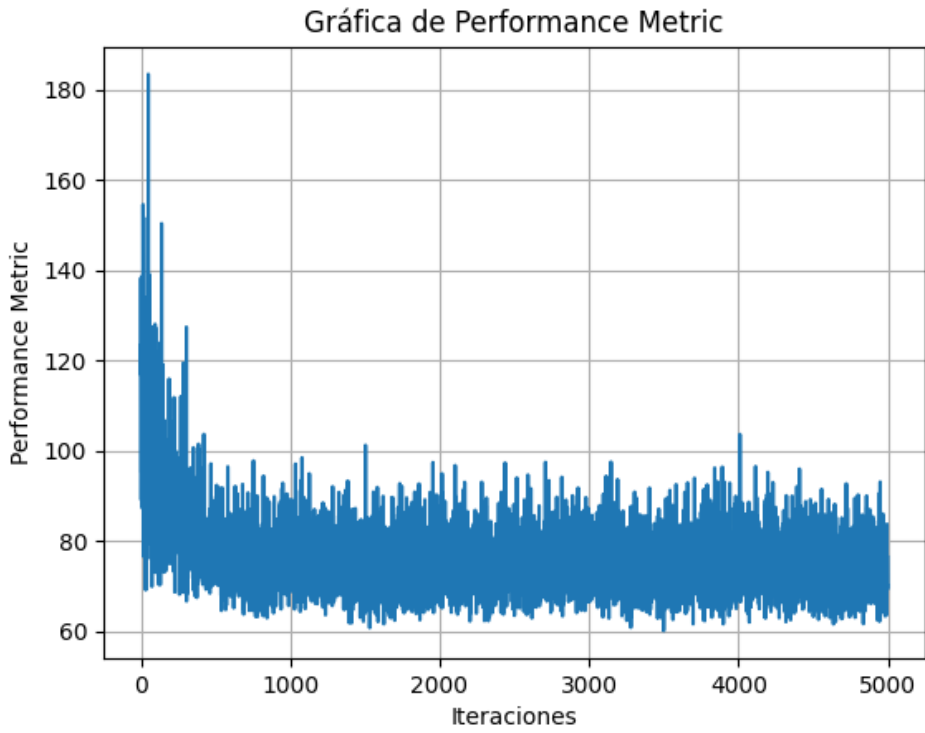


Figura 40: Valores de *performance\_metric* en la ejecución 9.

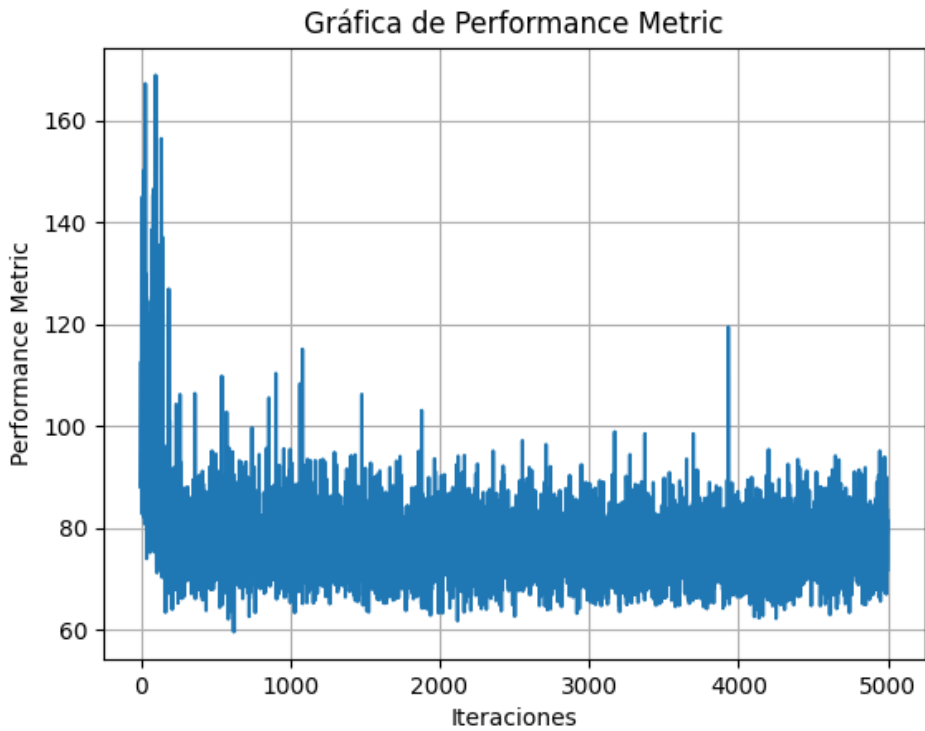


Figura 41: Valores de *performance\_metric* en la ejecución 10.

### 7. Conclusiones

En conclusión, este trabajo ha logrado alcanzar el objetivo principal planteado; optimizar la gestión semafórica de una intersección de la ciudad de Salamanca. Además, se han abordado objetivos secundarios como la revisión exhaustiva de los principales simuladores de tráfico disponibles en el mercado, el análisis de casos de estudio reales aplicados con simulador en la gestión del tráfico, la investigación sobre diferentes técnicas de optimización y la selección de un cruce específico en Salamanca como caso de estudio.

A lo largo del trabajo, se ha empleado una metodología que ha permitido recopilar datos relevantes de la intersección seleccionada y crear y ajustar el modelo de simulación definiendo los parámetros y las restricciones necesarias. Se ha empleado el algoritmo PSO como técnica de optimización para ajustar los tiempos de los semáforos y encontrar una configuración óptima para la duración de las fases de los semáforos en la simulación de la intersección.

Las optimizaciones realizadas han permitido ajustar los tiempos de los semáforos de manera efectiva reduciendo los valores de `performace_metric`. Con ello, se han adaptado los tiempos a las necesidades específicas de la intersección planteadas en la simulación y logrando una distribución más equitativa del flujo vehicular.

En resumen, este trabajo ha demostrado la importancia de utilizar simuladores de tráfico y técnicas de optimización en la gestión del tráfico para mejorar la eficiencia de la gestión vial. La aplicación de un enfoque metodológico, junto con el uso del parque de simulación SUMO y el algoritmo PSO, ha proporcionado resultados que abren las puertas para futuras investigaciones en el campo de la gestión del tráfico urbano.

Como línea de trabajo futuro, se sugiere explorar la implementación en un marco real de este trabajo, empleando tecnologías de visión artificial que permitiría obtener datos en tiempo real y lograr una optimización dinámica de los semáforos. Además, sería interesante la exploración de diferentes simuladores de tráfico, aparte de SUMO para evaluar su efectividad y comparar los resultados obtenidos. También se podrían investigar otras técnicas de optimización, como algoritmos genéticos o basados en inteligencia artificial.

## Referencias

- [1] Paramics microsimulation. [Citado en págs. VI y 13.]
- [2] Álvaro Acuna, Efram Arreche, and Sergio Nesmachnow. Planificación de tráfico y transporte colectivo en el corredor garzón utilizando un algoritmo evolutivo. *Universidad de la República, Montevideo*, 2015. [Citado en pág. 20.]
- [3] Tanzina Afrin and Nita Yodo. A survey of road traffic congestion measures towards a sustainable and resilient transportation system. *Sustainability*, 12(11):4660, 2020. [Citado en pág. 1.]
- [4] A. I. Ahmed and A. G. El.seed. Intelligent traffic light based on multi-agent system. In *2013 International Conference on Advanced Computer Science Applications and Technologies*, pages 89–92. [Citado en pág. 25.]
- [5] E. M. Ahmed. Continuous genetic algorithm for traffic signal control. In *2018 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE)*, pages 1–5. [Citado en pág. 21.]
- [6] Mahmuda Akhtar and Sara Moridpour. A review of traffic congestion prediction using artificial intelligence. *Journal of Advanced Transportation*, 2021:1–18, 2021. [Citado en pág. 1.]
- [7] N. Al-Nabhan, M. AlDuhaim, S. AlHussan, H. Abdullah, M. AlHaid, and R. AlDuhaishi. Ksutraffic: A microscopic traffic simulator for traffic planning in smart cities. *Cmc-Computers Materials Continua*, 68(2):1831–1845, 2021. [Citado en págs. VI y 9.]
- [8] Christian Backfrieder, Christoph F. Mecklenbräuker, and Gerald Ostermayer. Traffsim—a traffic simulator for investigating benefits ensuing from intelligent traffic management. pages 451–456. IEEE. [Citado en págs. 7 y 8.]
- [9] J. C. Ballesteros-Pacheco. Detección y mejora de tiempos en el flujo vehicular con semáforo inteligente controlador de tráfico para disminuir las emisiones de co<sub>2</sub>. *Revista de Ingeniería*, 1(1):1–8, 2017. [Citado en pág. 4.]
- [10] Salah Bouktif, Abderraouf Cheniki, Ali Ouni, and Hesham El-Sayed. Deep reinforcement learning for traffic signal control with consistent state and reward design approach. *Knowledge-Based Systems*, 267:110440, 2023. [Citado en págs. VI, 23 y 24.]
- [11] José A. Caballero and Ignacio E. Grossmann. Una revisión del estado del arte en optimización. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 4(1):5–23, 2007. [Citado en pág. 20.]
- [12] Laura Carballo, Norma Andrea Villagra, and Daniel Raul Pandolfi. Funciones de evaluación de calidad para un tránsito inteligente. *Informe Científico Técnico UNPA*, 13(1):77–94, 2021. [Citado en pág. 4.]

- [13] Jordi Casas, Jaime L. Ferrer, David Garcia, Josep Perarnau, and Alex Torday. Traffic simulation with aimsun. *Fundamentals of traffic simulation*, pages 173–232, 2010. [Citado en pág. 10.]
- [14] José A. Castán, Salvador Ibarra, Julio Laria, Javier Guzmán, and Emilio Castán. Control de tráfico basado en agentes inteligentes. *Polibits*, 50:61–68, 2014. [Citado en pág. 24.]
- [15] Seyit Alperen Celtek, Akif Durdu, and Muzamil Eltejani Mohammed Ali. Real-time traffic signal control with swarm optimization methods. *Measurement*, 166:108206, 2020. [Citado en págs. 20, 22 y 26.]
- [16] César Alejandro Chaves Pinzón. Simulación de escenarios de tráfico vehicular para la ciudad de bogotá. 2016. [Citado en págs. 7 y 8.]
- [17] Carla Patricia Chávez Fuentes. Sistema de semaforización inteligente para el control de flujo vehicular mediante el procesamiento digital de imágenes. B.S. thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas . . . , 2015. [Citado en pág. 7.]
- [18] Carla Patricia Chávez Fuentes. Sistema de semaforización inteligente para el control de flujo vehicular mediante el procesamiento digital de imágenes. 2015. [Citado en págs. VI, 6 y 7.]
- [19] C. Cisneros, L. Morales, M. Silvera, and F. Campos. Design of mini roundabouts with adaptive traffic lights to improve vehicular travel times and roundabout capacity in metropolitan cities. In *2022 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONITI)*, pages 1–6. [Citado en pág. 14.]
- [20] Francisco Arturo Cruz Zelante. Planificación optimizada de un sistema de semáforos mediante algoritmos evolutivos: una aplicación a la rotonda del padre anchieta, en santa cruz de tenerife. 2020. [Citado en pág. 20.]
- [21] Kevin Paul Delgado López. Prototipo de semáforo inteligente para control de tránsito terrestre mediante sensores de proximidad para el cantón montecristi. 2023. [Citado en pág. 6.]
- [22] Richard Dowling, Alexander Skabardonis, John Halkias, Gene McHale, and Grant Zammit. Guidelines for calibration of microsimulation models: framework and applications. *Transportation Research Record*, 1876(1):1–9, 2004. [Citado en pág. 12.]
- [23] Russell Eberhart and James Kennedy. A new optimizer using particle swarm theory. pages 39–43. Ieee. [Citado en pág. 22.]
- [24] P. M. Ejercito, K. G. E. Nebrija, R. P. Feria, and L. L. Lara-Figueroa. Traffic simulation software review. In *2017 8th International Conference on Information, Intelligence, Systems Applications (IISA)*, pages 1–4. [Citado en págs. VI, VI, 8, 9 y 10.]

- [25] Instituto Nacional de Estadística. Población residente en España por fecha, sexo y generación (edad a 31 de diciembre), 2021. [Citado en pág. 2.]
- [26] Nicolás Estupiñán. Movilidad compartida: un cambio de paradigma para la equidad y la inclusión. *Transporte y desarrollo en América Latina*, 1(1):9–10, 2018. [Citado en pág. 2.]
- [27] John C. Falcocchio and Herbert S. Levinson. *Road traffic congestion: a concise guide*, volume 7. Springer, 2015. [Citado en pág. 1.]
- [28] Martin Fellendorf and Peter Vortisch. Microscopic traffic flow simulator vissim. *Fundamentals of traffic simulation*, pages 63–93, 2010. [Citado en pág. 9.]
- [29] Carmen Socorro Lema Fernández, Luis Pedro Pedreira Andrade, Gemayqzel Bouza Allende, and Sira Allende Alonso. Estudio de la optimización del tráfico en un cruce a través del ajuste de los ciclos de los semáforos mediante recocido simulado. *Anales de ASEPUMA*, (19):23, 2011. [Citado en pág. 6.]
- [30] Francisco Javier Ferrer-Urbano, Jose Manuel Garcia-Nieto, Enrique Alba-Torres, and Francisco Chicano. Validación inteligente para la sincronización de semáforos basada en feature models. 2013. [Citado en págs. 10, 17 y 26.]
- [31] Orlando Fonseca Guilarte, Gabriel Santiago Pujol Fariña, Sira Allende Alonso, and Gemayqzel Bouza Allende. Una herramienta para simular y analizar el flujo de tráfico en un cruce regulado por semáforos con tiempos de ciclos variables. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 8:29–40, 2014. [Citado en pág. 3.]
- [32] Nicholas J. Garber and Lester A. Hoel. *Traffic and highway engineering*. Cengage Learning, 2019. [Citado en pág. 6.]
- [33] Jose Garcia-Nieto, Ana Carolina Olivera, and Enrique Alba. Optimal cycle program of traffic lights with particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 17(6):823–839, 2013. [Citado en pág. 22.]
- [34] Lim GiYoung, Kang JeongJin, and Hong YouSik. The optimization of traffic signal light using artificial intelligence. In *10th IEEE International Conference on Fuzzy Systems. (Cat. No.01CH37297)*, volume 3, pages 1279–1282 vol.2. [Citado en pág. 24.]
- [35] Jorge González Cabrera. Herramienta de modelado de carreteras para simuladores de tráfico. 2020. [Citado en pág. 3.]
- [36] Martin Gregurić, Miroslav Vujić, Charalampos Alexopoulos, and Mladen Miletić. Application of deep reinforcement learning in traffic signal control: An overview and impact of open traffic data, 2020. [Citado en pág. 23.]
- [37] Sergio Guerrero Paredes. Control inteligente de semáforos mediante aprendizaje automático. 2016. [Citado en págs. 6, 22 y 29.]

- [38] S. Haddouch, H. Hachimi, and N. Hmina. Modeling the flow of road traffic with the sumo simulator. In *2018 4th International Conference on Optimization and Applications (ICOA)*, pages 1–5. [Citado en págs. 11 y 18.]
- [39] T. M. Hamdani, A. M. Alimi, and F. Karray. Distributed genetic algorithm with bi-coded chromosomes and a new evaluation function for features selection. In *2006 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pages 581–588. [Citado en pág. 21.]
- [40] Rania Hassan, Babak Cohanim, Olivier De Weck, and Gerhard Venter. A comparison of particle swarm optimization and the genetic algorithm. page 1897. [Citado en pág. 22.]
- [41] V. Hirankitti and J. Krohkaew. An agent approach for intelligent traffic-light control. In *First Asia International Conference on Modelling Simulation (AMS'07)*, pages 496–501. [Citado en pág. 24.]
- [42] Serge P. Hoogendoorn and Piet H. L. Bovy. State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 215(4):283–303, 2001. [Citado en págs. 7 y 8.]
- [43] Armando Jacobo. Sistema de semáforos inteligentes utilizado sensores de presencia. *Rev. Aplicaciones de la Ingeniería*, pages 147–152, 2015. [Citado en pág. 4.]
- [44] L. Jiang, Y. Li, Y. Liu, and C. Chen. Traffic signal light control model based on evolutionary programming algorithm optimization bp neural network. In *2017 7th IEEE International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC)*, pages 564–567. [Citado en pág. 20.]
- [45] D. Jiménez, F. Muñoz, S. Arias, and J. Hincapie. Software for calibration of transmodeler traffic microsimulation models. In *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 1317–1323. [Citado en págs. vi, 12 y 14.]
- [46] Cihan Karakuzu and Osman Demirci. Fuzzy logic based smart traffic light simulator design and hardware implementation. *Applied Soft Computing*, 10(1):66–73, 2010. [Citado en pág. 24.]
- [47] C. C. Keat and S. S. Syed Ahmad. Simulation of smart traffic light by using image processing and reinforcement learning. In *2022 IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology (IICAJET)*, pages 1–6. [Citado en pág. 22.]
- [48] G. Kotusevski and K. A. Hawick. A review of traffic simulation software. 2009. [Citado en pág. 8.]

- [49] Daniel Krajzewicz, Markus Hartinger, Georg Hertkorn, Peter Mieth, Julia Ringel, Christian Rössel, and Peter Wagner. The "simulation of urban mobility" package: An open source traffic simulation. [Citado en págs. vi, 11, 12 y 26.]
- [50] Jung-Beom Lee. *Calibration of traffic simulation models using simultaneous perturbation stochastic approximation (spsa) method extended through bayesian sampling methodology*. Rutgers The State University of New Jersey, School of Graduate Studies, 2008. [Citado en pág. 12.]
- [51] C. Liu, C. Yan, C. Ma, and Q. Suo. Traffic light timing optimization based on improved particle swarm optimization. In *2022 IEEE 6th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, pages 635–639. [Citado en págs. 22 y 26.]
- [52] P. A. Lopez, M. Behrisch, L. Bieker-Walz, J. Erdmann, Y. P. Flötteröd, R. Hilbrich, L. Lücken, J. Rummel, P. Wagner, and E. Wiessner. Microscopic traffic simulation using sumo. In *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 2575–2582. [Citado en págs. vi y 11.]
- [53] Freddy Eduardo Lozado Gorotiza and Adriana Lisette Méndez Bazurto. Diseño de un prototipo para el control de tráfico vehicular en el cantón el triunfo, provincia del guayas. 2019. [Citado en pág. 6.]
- [54] T. Ma and B. Abdulhai. Genetic algorithm-based combinatorial parametric optimization for the calibration of microscopic traffic simulation models. In *ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No.01TH8585)*, pages 848–853. [Citado en pág. 12.]
- [55] Denis Pato Martínez, Vivian Félix López Batista, and Juan Francisco de Paz. Sistemas de detección y seguimiento de objetos a través de visión artificial. *Avances en Informática y Automática*, page 81. [Citado en pág. 28.]
- [56] T. Matsuo, Y. Kaneko, and M. Matano. Introduction of intelligent vehicle detection sensors. In *Proceedings 199 IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems (Cat. No.99TH8383)*, pages 709–713. [Citado en pág. 6.]
- [57] Fernando Mejia, Germán Torres, and Eduardo Villa. Modelo de semáforo inteligente empleando un algoritmo genético. *Infociencia*, 10(1):87–93, 2016. [Citado en págs. vi y 21.]
- [58] R. Mena, F. Zumárraga, L. Urquiza, and X. Calderón. Google maps route color mapping with sumo simulator. In *2019 International Conference on Information Systems and Software Technologies (ICI2ST)*, pages 92–99. [Citado en págs. vi, 13, 14, 26 y 29.]
- [59] Lawrence Javier Minguillán Van Kapel. Red de semáforos inteligentes para la reducción de partículas contaminantes y mejoras de tiempos de tránsito. 2022. [Citado en pág. 4.]

- [60] Guillermo Morales-Luna. Introducción a la lógica difusa. *Centro de Investigación y Estudios Avanzados. México*, 2002. [Citado en pág. 24.]
- [61] Mian Muhammad Mubasher and Jaffry Syed Waqar ul Qounain. Systematic literature review of vehicular traffic flow simulators. pages 1–6. IEEE. [Citado en pág. 7.]
- [62] Iván Agustín Munguía Torres. *Sistema de optimización de tráfico vehicular aplicado a la glorieta de Santa Fe*. Thesis, 2016. [Citado en pág. 2.]
- [63] Takashi Nagatani. Dispersion and scaling of fluctuating vehicles through a sequence of traffic lights. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 361(2):619–629, 2006. [Citado en pág. 6.]
- [64] S. M. Odeh, A. M. Mora, M. N. Moreno, and J. J. Merelo. A hybrid fuzzy genetic algorithm for an adaptive traffic signal system. *Advances in Fuzzy Systems*, 2015:378156, 2015. [Citado en pág. 24.]
- [65] Jimmi A. Olarte. Optimización de inventarios a través de agentes inteligentes. *ene*, 10:177. [Citado en pág. 24.]
- [66] Jimena Dolores Ortiz de Zúñiga Mingot. Optimización de los sistemas de control de tráfico rodado. 2022. [Citado en pág. 22.]
- [67] José D. Padrón, Marcos Terol, Jorge Luis Zambrano-Martinez, Carlos T. Calafate, Juan-Carlos Cano, and Pietro Manzoni. Evaluación del impacto de las restricciones de tráfico en los niveles de contaminación. 2022. [Citado en pág. 3.]
- [68] D. Panovski and T. Zaharia. Simulation-based vehicular traffic lights optimization. In *2016 12th International Conference on Signal-Image Technology Internet-Based Systems (SITIS)*, pages 258–265. [Citado en pág. 22.]
- [69] Diana Carolina Pardo Contreras. Agentes inteligentes: caso práctica desde la academia. 2007. [Citado en pág. 24.]
- [70] L. Passos and R. Rossetti. Traffic light control using reactive agents. In *5th Iberian Conference on Information Systems and Technologies*, pages 1–6. [Citado en págs. VI y 25.]
- [71] L. Peng, M. h. Wang, J. p. Du, and G. Luo. Isolation niches particle swarm optimization applied to traffic lights controlling. In *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference*, pages 3318–3322. [Citado en pág. 22.]
- [72] W. Peng, W. Jiang-Ping, and X. Jing. The application of particle swarm optimization on intelligent transport system. In *2009 ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management*, volume 4, pages 389–391. [Citado en pág. 22.]

- [73] J. I. Hidalgo Pérez and C. Cervigón Rückauer. Una revisión de los algoritmos evolutivos y sus aplicaciones, 2002. [Citado en págs. 20 y 21.]
- [74] Sócrates Muñoz Pérez, José Salcedo Reátegui, and Arturo Sotomayor Mendoza. Contaminación ambiental producida por el tránsito vehicular y sus efectos en la salud humana: revisión de literatura. *INVENTUM*, 16(30):20–30, 2021. [Citado en pág. 2.]
- [75] Julián-Rodrigo Quintero-González. Del concepto de ingeniería de tránsito al de movilidad urbana sostenible. *Ambiente y desarrollo*, 21(40):57–72, 2017. [Citado en pág. 4.]
- [76] Julián Rodrigo Quintero González and Lina Fernanda Prieto Vaca. Sistemas inteligentes de transporte y nuevas tecnologías en el control y administración del transporte. *Puente. Revista Científica*, 2015. [Citado en pág. 4.]
- [77] Nedal T. Ratrouf, Syed M. Rahman, and Imran Reza. Calibration of paramics model: Application of artificial intelligence-based approach. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40:3459–3468, 2015. [Citado en pág. 12.]
- [78] Trevor Reed. Inrix global traffic scorecard. 2019. [Citado en pág. 1.]
- [79] R. Michael Robinson, Andrew J. Collins, Craig A. Jordan, Peter Foytik, and Asad J. Khattak. Modeling the impact of traffic incidents during hurricane evacuations using a large scale microsimulation. *International journal of disaster risk reduction*, 31:1159–1165, 2018. [Citado en pág. 1.]
- [80] Gerardo Rosales Robles, Jorge Edmundo Mastache Mastache, Roberto López Ramírez, and Jesús Namigtle Jiménez. Mpp optimization in photovoltaic systems under partial shading conditions applying pso, ipso and aiwpsa. *Revista Aristas*, 9(17):226–234, 2022. [Citado en pág. 30.]
- [81] Manuel Romero Placeres, Francisca Diego Olite, and Mireya Álvarez Toste. La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista cubana de higiene y epidemiología*, 44(2):0–0, 2006. [Citado en pág. 4.]
- [82] Mery E. Ruiz, César M. Mayorga, Darwin S. Aldas, and John P. Reyes. El costo y la percepción en la sociedad por congestión vehicular causada por el transporte público urbano en la ciudad de ambato, ecuador. *Espacios*, 40(43):42, 2019. [Citado en pág. 2.]
- [83] Víctor Samaniego-Calle, Marlon Santiago Viñán-Ludeña, Wilson Jaramillo-Sangurima, Luis Jácome-Galarza, and Javier Sinche-Freire. Semáforos inteligentes y tráfico vehicular: un caso de estudio comparativo para reducir atascos y emisiones contaminantes. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, (E19):403–414, 2019. [Citado en págs. 3 y 4.]
- [84] Julián F. Segura-Contreras and Juan F. Franco. Exposición de peatones a la contaminación del aire en vías con alto tráfico vehicular. *REVISTA DE SALUD PÚBLICA*, 18(2):179–187, 2016. [Citado en pág. 4.]

- [85] Yang Shi, Hongcheng Liu, Liang Gao, and Guohui Zhang. Cellular particle swarm optimization. *Information Sciences*, 181(20):4460–4493, 2011. [Citado en pág. 20.]
- [86] Reuben Tamakloe, Jungyeol Hong, and Jihoon Tak. Determinants of transit-oriented development efficiency focusing on an integrated subway, bus and shared-bicycle system: Application of simar-wilson’s two-stage approach. *Cities*, 108:102988, 2021. [Citado en pág. 2.]
- [87] J. Tan, X. Chen, and M. Du. A novel p2p identification algorithm based on genetic algorithm and particle swarm optimization. In *2010 3rd International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Programming*, pages 22–29. [Citado en págs. 20 y 22.]
- [88] Marcos Terol Lloret. Solución para la gestión de tráfico de valencia en base a criterios ambientales. 2021. [Citado en págs. 16 y 30.]
- [89] Ian Thomson and Alberto Bull. *La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales*. Cepal, 2001. [Citado en pág. 1.]
- [90] A. Tigga, L. Hota, S. Patel, and A. Kumar. A deep q-learning-based adaptive traffic light control system for urban safety. In *2022 4th International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICAC3N)*, pages 2430–2435. [Citado en pág. 22.]
- [91] Ivan Agustin Munguia Torres. Sistema de optimización de tráfico vehicular aplicado a la glorieta santa fe. 2016. [Citado en págs. 20, 21 y 31.]
- [92] Dirección General de Tráfico. Anuario estadístico del ministerio del interior 2020, 2020. [Citado en págs. VI y 2.]
- [93] Dirección General de Tráfico. Parque nacional de vehículos por comunidad autónoma, provincia, tipo de vehículo y tipo de carburante, 2022. [Citado en pág. 2.]
- [94] Naciones Unidas. Objetivos de desarrollo sostenible, 2015. [Citado en pág. 3.]
- [95] Sandra Liliana Uribe. Propuesta metodológica para el diseño de intersecciones urbanas. *INVENTUM*, 4(7):46–54, 2009. [Citado en pág. 2.]
- [96] Pedro Uribe Chavert. Sistema de control de tráfico automático basado en dispositivos modulares heterogéneos. 2020. [Citado en págs. 6 y 28.]
- [97] Alma De Jesús Valladares Mejía. Comparación de un enfoque macroscópico y otro microscópico al estimar las demoras por la congestión urbana. *Escuela de Ingeniería Civil*, 2016. [Citado en pág. 7.]
- [98] A. Vogel, I. Oremović, R. Šimić, and E. Ivanjko. Improving traffic light control by means of fuzzy logic. In *2018 International Symposium ELMAR*, pages 51–56. [Citado en pág. 24.]

- [99] Yanli Wang, Xiaoyu Zhu, Linbo Li, and Bing Wu. Reasons and countermeasures of traffic congestion under urban land redevelopment. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 96:2164–2172, 2013. [Citado en pág. 1.]
- [100] I. G. P. S. Wijaya, K. Uchimura, and G. Koutaki. Traffic light signal parameters optimization using particle swarm optimization. In *2015 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, pages 11–16. [Citado en pág. 22.]
- [101] Haifeng Xiao, Ravi Ambadipudi, John Hourdakis, and Panos Michalopoulos. Methodology for selecting microscopic simulators: Comparative evaluation of aimsun and vissim. 2005. [Citado en págs. 9 y 10.]
- [102] Nita Yodo, Pingfeng Wang, and Melvin Rafi. Enabling resilience of complex engineered systems using control theory. *IEEE Transactions on Reliability*, 67(1):53–65, 2017. [Citado en pág. 6.]
- [103] Jorge Zambrano Martinez. Sistema centralizado para la optimización del tráfico mediante un servidor de rutas. 2016. [Citado en págs. 12 y 30.]
- [104] S. Zhancheng. Research on application of deep reinforcement learning in traffic signal control. In *2021 6th International Conference on Frontiers of Signal Processing (ICFSP)*, pages 17–21. [Citado en pág. 22.]
- [105] Yicheng Zhang and Rong Su. An optimization model and traffic light control scheme for heterogeneous traffic systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 124:102911, 2021. [Citado en pág. 6.]
- [106] Y. Zhao, J. Shi, S. Xia, S. Li, and K. Zhang. Study on the evaluation of microcirculation traffic organization optimization in old urban area based on microscopic simulation. In *2020 3rd International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE)*, pages 93–98. [Citado en pág. 17.]
- [107] Aydin İ, M. Sevi, G. Güngören, and H. C. İrez. Signal synchronization of traffic lights using reinforcement learning. In *2022 International Conference on Data Analytics for Business and Industry (ICDABI)*, pages 103–108. [Citado en págs. VI y 23.]