



## [201015] Modelación de un sistema inteligente de tráfico vehicular por medio de una simulación basada en agentes.

Laura Cárdenas González <sup>1 a,c</sup>, Camila Soto Lozano <sup>2 a,c</sup>,

Jose Fernando Jimenez Gordillo <sup>b,c</sup>,

<sup>a</sup>Estudiante de Ingeniería Industrial

<sup>b</sup>Profesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

<sup>c</sup>Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

---

### Abstract

In recent years, people's quality of life has been affected by the constant increase in population. This is especially prevalent in cities, where vehicle traffic is increasing every day, causing time losses to their inhabitants. In order to analyze the behavior of vehicular traffic, a distributed control architecture is designed to represent different traffic systems by means of an agent-based simulation. The simulation will be done in Netlogo's multi-agent modeling software.

First, the parameters, variables and indicators of influence on the operation and behavior of vehicular traffic in Bogotá were identified. From the information collected, a zone of the city was chosen for the construction of the model, together with the system's agents and their attributes. Secondly, the structure of the control architecture was built. In this work, only the executing level was analyzed, which is given by the heterarchic communication among the agents. Thirdly, four different behaviors of intelligent traffic lights were identified, so they were all evaluated together to validate the efficiency of each one. Finally, statistical validation and sensitivity analysis were carried out to identify the best policy together with the variables of greatest impact and thus improve vehicle flow. The designed control architecture resulted in a flexible multi-agent model capable of describing vehicle behavior.

*Keywords: Multi-agent system, distributed control architecture, agent-based simulation, Netlogo*

---

### 1. Justificación y planteamiento del problema

En las últimas décadas, la población mundial ha incrementado en gran medida. Según un estudio de las Naciones Unidas, desde el año 1950 hasta el 2019 se estimó un crecimiento de la población mundial de 5100 millones de personas en el mundo (ONU, 2019). Por otro lado, Martínez Campos S. & Alcalá Sánchez I. (2011), afirman “En el año 1950 menos del 30% del total de los habitantes en el mundo, vivían en ciudades. Según cifras oficiales, para el año 2000, ese porcentaje se elevó al 47%. Por otra parte, está pre visto que para el año 2030, aumentará hasta alcanzar el 60% de la población mundial”. Con el aumento de la población urbana, los gobiernos se ven en la obligación de proponer y desarrollar estrategias para mejorar la calidad de vida de los habitantes.

Las smart cities nacen como una estrategia para proveer infraestructuras que garanticen un desarrollo sostenible, un incremento de la calidad de vida de los ciudadanos y una mayor eficiencia de los recursos disponibles. Washburn, D., Sindhu, U., Balaouras, S., Dines, R. A., Hayes, N., & Nelson, L. E. (2009), definen el concepto de Smart Cities como “el uso inteligente de las tecnologías computacionales para hacer los componentes de la infraestructura y los servicios de una ciudad (incluyendo la administración de la ciudad, la educación, la salud, seguridad pública, bienes raíces, transporte y riqueza) a ser más inteligentes, interconectados y eficientes”. Además, Suha Alawadhi et al. (2012), explican que una ciudad inteligente es aquella que conoce las necesidades de sus ciudadanos, creando nuevas oportunidades de empleo, incrementando el interés regional, y siendo un foco atractivo para nuevos negocios lo que supone la creación de condiciones deseables para las personas en un ambiente sostenible.

Moreno, L., & Gutiérrez, A. (2012)., manifiestan en su investigación algunos beneficios de las Smart Cities; En primer lugar, estas ciudades buscan centrarse en las necesidades de sus habitantes por medio del uso de infraestructura intensiva en tecnologías de la información. En adición, estas tecnologías deben plantear soluciones inteligentes que sean costo-eficientes, integradas e interconectadas. Mardacany, E. (2014) describe 7 principales características de las Smart Cities, las cuales son: política inteligente, gobierno inteligente, gente inteligente, entorno inteligente, entorno construido inteligente que incluye la infraestructura urbana y su planeación, vida inteligente que abarca casas inteligentes y salud, y, por último, ciencia y tecnología inteligente que incluye transporte urbano inteligente. Los componentes de las Smart Cities son mostrados a continuación:

**Figura 1**  
Componentes de las Smart cities



Nota. Tomado de *Internet of things: a definition & taxonomy* (2015).

Actualmente, el tráfico vehicular es uno de los principales problemas de las ciudades. Este problema reduce las velocidades de circulación, produciendo incrementos en el tiempo de viaje y, además, está directamente asociado al aumento de demoras, uso ineficiente del combustible y el incremento de la contaminación atmosférica (Bull, A., 2003). Según INRIX, el congestionamiento ha afectado dramáticamente la población, la economía, la infraestructura, la proliferación de viajes compartidos y servicios de entrega. Además, según el estudio realizado por esta empresa en el 2018, Bogotá es la tercera ciudad con peor tráfico de 200 ciudades estudiadas, con aproximadamente 272 horas perdidas en el tráfico (Reed, T., 2019).

Según Rodrigo Fernández en su libro *Elementos de la teoría del tráfico vehicular*, el tránsito vehicular es un fenómeno causado por el flujo de vehículos en una vía, calle o autopista. Las tres características principales que afectan el flujo son: velocidad, intensidad de tránsito y densidad de vehículos. La relación de estas tres características puede causar un mejor o deterioro en el flujo vehicular (Fernández., 2011). El control de tráfico vehicular se implementa a finales de la década de 1960 con el objetivo de evitar congestiones y proporcionar calles más seguras para los ciudadanos (Linares, B.R.J.M., & Sánchez, J., 2013).

Con el tiempo, las señales de control de tráfico fueron desarrolladas, creando así 2 tipos: Estáticos y dinámicos. Los semáforos de tiempo fijo fueron una de las primeras respuestas a la necesidad del control de tráfico, en donde sus longitudes de ciclo varían entre los 35 y 120 segundos (Smith, S. F., Barlow, G. J., Xie, X. F., & Rubinstein, Z. B., 2013). Posteriormente, los semáforos de tiempo dinámico que por medio de sensores detectan distintos tipos de vehículos y peatones, lo que facilita una cadena de luces verdes en los semáforos

(Nagatani, T., 2007). La inteligencia artificial puede contribuir al desarrollo de modos de operación nuevos e inteligentes para las infraestructuras existentes de sistemas de transportes, así como también, tecnologías como Big Data e IoT (Miles, J. C., & Walker, A. J., 2006). La combinación de estas tecnologías se conoce como Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), que involucran aplicaciones integradas de comunicaciones, control y tecnologías de procesamiento de información al sistema de transporte (Nagatani, T., 2007). Actualmente, existen distintas formas de solucionar los problemas de tráfico en grandes ciudades como la simulación de sistemas multi-agente, metaheurísticas y tecnología RFID, descritas con mayor detalle a continuación:

**Sistemas Multiagentes:** los agentes son entidades dentro de un entorno que pueden percibir e interactuar, un sistema multi-agente permite coordinar el comportamiento de los agentes, interactuando y comunicándose con el entorno. Este es un sistema compuesto por múltiples agentes interactuando entre sí, y es usado para resolver problemas que son difíciles o imposibles de resolver para sólo un agente (Marzougui, B., Hassine, K., & Barkaoui, K., 2011). Los beneficios de usar modelos con multiagentes es que toman en cuenta la dinámica del ambiente de estudio. Estos sistemas pueden mejorar la coordinación de tareas evaluando el comportamiento de los diferentes agentes (Leticia, A., 2016).

**Metaheurísticas:** las metaheurísticas son algoritmos independientes de problemas de alto nivel que proporcionan un conjunto de pautas y estrategias para desarrollar algoritmos de optimización heurística. Algunos de los ejemplos más notables de la metaheurística son los algoritmos genéticos, búsqueda tabú, evolutivos, de búsqueda, recocido simulado y optimización de colonia de hormigas (Sörensen, K., & Glover, F., 2013). Para los sistemas inteligentes de tráfico el tipo de metaheurística más usada es la optimización de colonia de hormigas.

**Tecnología RFID (Radio Frequency Identification):** la tecnología RFID tiene como objetivo identificar objetos de forma rápida, con poca transmisión de información y en un entorno cercano, esta tecnología funciona de una manera similar a un código de barras (Alexandres Fernández, S., Rodríguez-Morcillo García, C., & Muñoz Frías, J. D., 2006). La tecnología RFID ayuda a calcular la densidad de los vehículos para ayudar a controlar las señales de tráfico, además esta tecnología ayuda a detectar distintos tipos de vehículos según sea su etiqueta como por ejemplo ambulancias (Naik, T., Roopalakshmi, R., Ravi, N. D., Jain, P., & Sowmya, B. H., 2018).

Las soluciones antes mencionadas presentan diferentes metodologías para la solución de problemas de tráfico en las ciudades. Sin embargo, el principal desafío que estas presentan es medir el impacto que tendrían estas soluciones en la realidad. La simulación basada en agentes provee la facilidad de cambiar frente a cambios inesperados y además cuenta con la posibilidad de actuar diferente dependiendo de la fecha, hora y situación climática (Fonseca, C., 2016). Adicionalmente, otro de los desafíos es diseñar adecuadamente una arquitectura de control distribuida con el fin de modelar correctamente el comportamiento del tráfico de la ciudad.

Este proyecto va a desarrollar una simulación basada en un sistema multi-agente. Puesto que, los sistemas multi-agentes son flexibles, lo que connota la capacidad de responder correctamente a situaciones dinámicas y autónomas, es decir, los agentes son capaces de programar sus propias acciones. Además, el entorno es extensible, en consecuencia, el entorno tiene la capacidad de agregar fácilmente nuevas funcionalidades al sistema. En adición es tolerante a fallas debido a lo cual, si por alguna razón alguna parte del sistema falla, el sistema puede cumplir con su objetivo de diseño sin afectar el resultado (McArthur, S. D., Davidson, E. M., Catterson, V. M., Dimeas, A. L., Hatziargyriou, N. D., Ponci, F., & Funabashi, T., 2007).

Teniendo en cuenta las problemáticas descritas anteriormente, los desafíos de esta investigación son diseñar una arquitectura de control distribuida para representar y modelar un sistema inteligente de tráfico vehicular por medio de una simulación basada en agentes. De esta manera, este trabajo de grado se va a enfocar sobre la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo debería ser una arquitectura de control distribuida para representar y modelar un sistema inteligente de tráfico vehicular? Igualmente, una sub-pregunta de investigación que también se buscaría contribuir a su resolución sería: ¿Qué criterios de evaluación se deberían tener en cuenta en esta arquitectura de control para validar la eficiencia de esta misma sobre el sistema vehicular?

2. Antecedentes

Actualmente, la población mundial ha crecido en gran cantidad y a su vez, gran parte de la población se ha desplazado cada vez más hacia áreas urbanas. Por tanto, el congestionamiento vehicular es uno de los mayores problemas para las personas hoy en día (Durán, F. E., 2005). Investigadores en la temática han desarrollado aproximaciones interesantes, tales como un artículo en donde se implementó un simulador que tuvo como base el algoritmo de colonia de hormigas y donde se obtuvo la reducción en el tiempo de cruce, reducción del consumo de combustible y la reducción de emisión de gases (Ferrando Á., 2016). Loarte R. & Quizhpe B. (2015), por otro lado, publicaron un artículo en donde se desarrolló y simuló un sistema multi-agente con el objetivo de que los semáforos se comuniquen entre ellos y logren tomar decisiones de manera autónoma cuando se produce un evento inesperado y, así, trazar una ruta hacia su lugar de destino evitando los semáforos en donde se produzcan eventos inesperados (Loarte R. & Quizhpe B., 2015). Por último, se evidencia un artículo en donde se desarrolló una simulación basada en agentes con diferentes tipos de vehículos, diferentes escenarios de simulación y, en donde se obtuvo como resultado la reducción del tiempo de cola (Nacht J., Falco M. & Robiolo G. 2018). Para este trabajo de grado, se ha realizado una revisión literaria para establecer cuáles son los métodos más usados para los sistemas de tráfico inteligente, sus finalidades, características, resultados y consideraciones adicionales.

Esta revisión se realizó en bases de datos como IEEE Explore, Springerlink, Science Direct y Google Académico. Además, las palabras clave usadas para la búsqueda fueron: Sistema multi-agente, semáforos inteligentes, tráfico vehicular, simulación, control inteligente de tráfico, multiagent system, smart traffic lights y smart traffic system. Después de un filtro de los artículos científicos encontrados, los resultados obtenidos de esta revisión literaria se presentan a continuación (ver tabla 1).

Tabla 1  
Revisión literaria

a) Finalidad de la investigación: b) Características particulares del sistema c) Tecnología usada en la simulación e) Consideraciones adicionales	a		b			c			d			d	
	Reducción de tiempo de cruce	Reducción de tiempo de espera	Reducción de tiempo de cruce	Reducción de tiempo de cruce	Reducción de tiempo de cruce	Reducción de tiempo de cruce	Reducción de tiempo de cruce	Reducción de tiempo de cruce	Reducción de tiempo de cruce	Reducción de tiempo de cruce	Reducción de tiempo de cruce		
	X		X			X	X	X	X				Una sistema RFID o GPS
		X	X			X	X	X	X		X		Use de Algoritmos evolutivos de simulación y algoritmo comportamiento de conductores
		X		X	X	X	X	X	X	X			Tiene un agente una vía principal y sus vías secundarias
	X		X	X	X	X				X			Diferenciación de flujos en horas pico
		X		X		X	X			X			Considera eventos inesperados a través simulación de conductores
			X	X	X	X	X	X		X		X	Diseño de un simulador y diferentes experimentaciones, algoritmo colonia de hormigas
		X	X	X	X	X	X	X				X	Use de Q-learning
	X		X	X	X	X	X	X	X	X			Use de diferentes escenarios de simulación
		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	Diferenciación en el comportamiento de los conductores
	X		X	X	X	X	X	X	X	X			Use de teoría de colas
	X		X	X	X		X		X	X			Use de tecnología RFID
	X		X	X	X		X	X		X			Diseño de un agente PID
	X		X	X	X		X	X		X			Use de diferentes escenarios de simulación
	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X		Use de tecnología RFID
	X		X	X	X	X	X	X	X	X			Tiene un agente posición dentro del sistema y diferentes escenarios de simulación
	X		X	X	X	X	X	X	X	X			Tiene un agente la zona geográfica de la ciudad
	X		X	X	X	X	X	X	X	X			Use la tecnología Vehículo to Vehículo y control de velocidad
		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		Análisis de gases generados por vehículos

Nota. Autoría propia

En base a los resultados obtenidos en la búsqueda y después de seleccionar los artículos más relevantes para esta investigación, los principales objetivos encontrados se pueden dividir en tres grupos, considerando el objetivo principal del sistema de transporte vehicular: reducción de tiempos, mayor fluidez vehicular y mejora de condiciones para los ciudadanos.

## **2.1 Artículos cuyo objetivo y/o finalidad es mejorar las condiciones de los ciudadanos**

En este grupo se encuentran los artículos cuyo objetivo y/o finalidad es mejorar alguna o varias de las condiciones de los ciudadanos como la reducción de la emisión de gases, que a su vez ayuda a reducir la contaminación. Estos artículos son presentados a continuación.

Sáenz P., Benito J. & Galindo J. (2013), desarrollaron un sistema inteligente de control de tráfico para la ciudad de Valladolid España, que permita a la ciudad coordinarse y autogestionarse de forma que el sistema sea capaz de responder ágilmente a las necesidades cambiantes de tráfico y así, mejorar las condiciones de sus ciudadanos. Igualmente, Ferrando Á. (2016), implementó un simulador que permita probar y comparar distintas técnicas de gestión del paso de vehículos por una intersección, este simulador tuvo como base el algoritmo de colonia de hormigas y los resultados obtenidos son la reducción en el tiempo de cruce, reducción del consumo de combustible y la reducción de emisión de gases. Asimismo, Samaniego V., Viñán M., Jaramillo W., Jácome L. & Sinche J. (2019), desarrollaron una microsimulación en la zona céntrica de la ciudad de Loja, posteriormente, se recolectaron datos de los semáforos actuales de la ciudad de Loja para después definir los escenarios de simulación y como resultado se obtuvo la reducción media de la contaminación por ruido de 1,46%; CO<sub>2</sub> de 13,72%; PM<sub>x</sub> de 15,61%; HC de 14,21%; NO<sub>x</sub> de 14,58% y el número de vehículos en 11,75%. De la misma manera, Higuera C. (2016), desarrolló y simuló una metodología multi-agente para el control adaptativo de la semaforización de una malla vial, basándose en el aprendizaje por refuerzo, para que el sistema de control por medio de una interacción directa con el tránsito encuentre una política óptima que disminuya la congestión vehicular, los tiempos de espera y el impacto ambiental. Se obtuvo como resultado una disminución en el tiempo de espera y reducción de la emisión del CO<sub>2</sub>. También, Kuppusamu, P., Kamarajapandian, P., Sabari, M. S., & Nithya, J. (2018), desarrollaron un sistema de tráfico inteligente por medio del uso de la tecnología RFID. Este sistema propuso usar un servidor inteligente con infraestructura en la nube para mejorar la señal del tiempo de procesamiento en la señal de tráfico de una intersección. Se obtuvo como resultado la reducción del tiempo de espera atascos y de la contaminación.

Los resultados obtenidos en los artículos presentados muestran disminuciones en la reducción del combustible, la emisión de gases y una mayor capacidad de responder ágil y adecuadamente a los cambios en el tráfico, lo que implica una mejora en las condiciones de los ciudadanos. Estos resultados fueron obtenidos mediante el uso de metodologías como simulación, y tecnología RFID. En consecuencia, lo más relevante en estos artículos es mejorar las condiciones de vida de los ciudadanos.

## **2.2 Artículos cuyo objetivo y/o finalidad es la reducción de tiempos**

En este grupo se encuentran los artículos cuyo objetivo y/o finalidad es la reducción de tiempos como, el tiempo de espera en un semáforo o en cola y el tiempo de trayecto. En todos los artículos son mencionados a continuación.

Nacht J., Falco M. & Robiolo G. (2018), desarrollaron una simulación basada en agentes cuyo objetivo es reducir el tiempo de espera de los conductores en una intersección de calles; se modelaron vehículos particulares, taxis, peatones y un semáforo inteligente que evalúa los pesos de los flujos en las direcciones X y Y. Además, se desarrollaron diferentes escenarios de simulación y se obtuvo como resultado la reducción del tiempo de cola. Asimismo, Loarte R. & Quizhpe B. (2015), desarrollaron y simularon un sistema multi-agente con el objetivo de que los semáforos se comuniquen entre ellos y logren tomar decisiones de manera autónoma. Los semáforos se comunican cuando se produce un evento inesperado, marcan así el mapa dando la posibilidad al usuario de evitar los semáforos con eventos inesperados y trazar una ruta hacia su lugar de destino, reduciendo tiempo del trayecto. Igualmente, Fernández T., Fuentes S., Illi J., Nacht J., Falco M., Pezzuchi G. & Robiolo G. (2018), desarrollaron un algoritmo cuyo objetivo es reducir el tiempo de espera de los conductores en una intersección. La validación fue llevada a cabo en tres distintos escenarios posibles y se obtuvo como resultado una reducción del 45% del tiempo de espera de los conductores. De igual modo, Camacho J., Medina S. & Terán O. (2012), desarrollaron un modelo multi-agente que simula el tráfico de automóviles en una intersección de la ciudad de Mérida. En el sistema se tuvieron en cuenta distintos tipos de vehículos, así como también, comportamientos propios de los conductores (agresivos y pasivos), se simularon distintos escenarios y como resultado se obtuvo una reducción de infracciones y peligro en el cruce. También, Pérez C. & Ramos H. (2017),

identificaron las relaciones entre el comportamiento vehicular y la ocupación de vías y, posteriormente, desarrollaron un modelo multi-agente del comportamiento de los vehículos en la ciudad de Bogotá D.C. En adición, se desarrollaron diferentes modelos de simulación y se obtuvo como resultado la reducción del tiempo de cola. De igual manera, Rhodes C. & Djahel S. (2017), propone un mecanismo científico llamado TRADER (Traffic Light Phases Aware Driving for Reduced Traffic Congestion), para reducir el tiempo total de viaje de los conductores en ciudades inteligentes. Diferentes escenarios de simulación fueron evaluados y se obtuvo como resultado una reducción en el tiempo de viaje del 31,44%.

Los resultados obtenidos en los artículos presentados muestran disminuciones en los tiempos de cola o de espera y en el tiempo total del trayecto o de viaje. Estos resultados fueron obtenidos mediante el uso de diferentes métodos como la simulación y los algoritmos. Por consiguiente, lo más relevante en estos artículos es disminuir el tiempo ya sea el de espera o el de trayecto.

### **2.3 Artículos cuyo objetivo y/o finalidad es mejorar el flujo vehicular**

En este grupo se encuentran los artículos cuyo objetivo y/o finalidad es mejorar el flujo vehicular en una ciudad o en una intersección. Estos artículos son presentados a continuación.

De Oca, J. A. M. M., Laglera, J. L. M., & Collado, J. C. (2007), desarrollaron un Sistema de Gestión de Movilidad (SIGEMO) que centraliza todos los sistemas de control y gestión del tráfico y el estacionamiento. En adición, el sistema usó el sistema automático de identificación RFID. También, Mancilla M., López E. & Hermenegildo L. (2019), presentan un marco modelado para una arquitectura basada en componentes que permiten validar estrategias de control para el tráfico urbano. El sistema usó la tecnología V2X (vehículo a vehículo) y, se obtuvo como resultado una mejor fluidez vehicular. De igual modo, Castán A., Ibarra S., Laira J, Guzmán J & Castán E. (2014), desarrollaron un modelo basado en agentes autónomos e inteligentes capaces de manipular las fases de los ciclos de tiempos de acuerdo con sus exigencias y limitaciones. En adición, las horas pico fueron tomadas en cuenta y como resultado se obtuvo una mejor fluidez vehicular. Asimismo, Orozco H, Lazcano S & Landassuri V. (2018), desarrollaron un sistema de control inteligente basado en agentes autónomos, buscando balancear los tiempos de espera en luz roja y luz verde para agilizar el flujo. El sistema fue desarrollado con la topología de Manhattan y se obtuvo como resultado una mejor fluidez vehicular. De la misma manera, Sánchez P. (2017), analizó los factores que incluyen el congestionamiento vehicular mediante el conteo manual del volumen del tráfico en cada semáforo con la teoría de colas para posteriormente obtener su nivel de servicio y relación volumen (v/c) capacidad. El resultado obtenido es una mejor fluidez vehicular. Del mismo modo, Díaz N., Guerra J. & Nicola J. (2018), diseñaron e implementaron un sistema de semáforos autónomos para mejorar la eficiencia del flujo de tráfico en las carreteras urbanas. El sistema se desarrolló en la plataforma Raspberry Pi y el sensor PIR y, se obtuvo como resultado una mejor fluidez vehicular. Igualmente, Atta, A., Abbas, S., Khan, M. A., Ahmed, G., & Farooq, U. (2018), desarrollaron un método para hacer que el tiempo de la señal de los sensores fuera proporcional a la congestión en las carreteras en cualquier momento. El sistema propuesto puede mantener los tiempos dinámicos de las señales de tráfico mediante la detección de la densidad del tráfico y así, minimizar la congestión o mejorar la fluidez del tráfico vehicular. Se obtuvo como resultado un mejor flujo vehicular.

Los resultados obtenidos en los artículos presentados muestran como resultado una mejor fluidez vehicular. Estos resultados fueron obtenidos mediante el uso de diferentes metodologías como sistemas de control de tráfico mediante el uso tecnología RFID, tecnología V2X y simulación. Consecuentemente, para estos artículos, lo más importante es mejorar el flujo vehicular en las vías.

### **3. Objetivos**

#### *3.1. Objetivo general*

*Diseñar una arquitectura de control distribuida para representar y modelar un sistema inteligente de tráfico vehicular por medio de una simulación basada en agentes.*

#### *3.1.2. Objetivos específicos*

1. Identificar el comportamiento del tráfico en la ciudad de Bogotá por medio de los datos proporcionados por la alcaldía y Uber, y determinar los parámetros y variables de influencia para comprender el comportamiento actual del tráfico de la ciudad.
2. Construir una arquitectura de control distribuida para definir los parámetros, variables de influencia y el comportamiento del modelo de tráfico vehicular.
3. Desarrollar una validación de la arquitectura de control propuesta para comparar con los métodos tradicionales de funcionamiento de los semáforos en el tráfico de la ciudad.
4. Comprobar en diferentes escenarios de simulación las condiciones y características de mayor valor para evaluar la robustez del modelo de control distribuido.

#### *3.2 Declaración de diseño*

Desarrollo de una simulación basada en agentes que permita representar un sistema inteligente del tráfico vehicular en la ciudad de Bogotá. Esto se realizará considerando el comportamiento de las diferentes variables del flujo vehicular y el diseño actual de la ciudad.

#### *3.3 Requerimientos esperados de diseño*

Los siguientes requerimientos deben satisfacerse:

1. El modelo diseñado debe ser flexible para que al implementar cambios siga funcionando el sistema basado en agentes.
2. El comportamiento del modelo debe arrojar una solución factible con resultados coherentes y concluyentes que permitan reflejar un sistema inteligente de tráfico vehicular.
3. La simulación debe reflejar de una manera clara el comportamiento de una ciudad con un sistema inteligente.

#### *3.4 Restricciones de diseño*

El desarrollo de la simulación se encuentra sujeto a las siguientes restricciones de diseño:

1. La base de datos para establecer los parámetros y las variables no es muy amplia.
2. Debido al tiempo y al alcance del proyecto, no es posible validar el modelo realizado en Netlogo con la ciudad real pues Bogotá no ha implementado este sistema inteligente en las calles.
3. No se tendrán en cuenta los peatones en el desarrollo y comportamiento del estudio.

#### *3.5 Normas y estándares*

La familia de normas ISO/IEC 25000 también conocida como SQuaRE (System and Software Quality Requirements and Evaluation) tienen por objetivo la creación de estándares para evaluar la calidad de un producto de software. De acuerdo con la organización internacional de la estandarización, estas normas definen la calidad del producto y evalúan las guías prácticas para su aplicación. Para este trabajo, serán necesarias las métricas para realizar la medición de la calidad de datos, las entradas al proceso, las restricciones y los recursos necesarios para llegar a las salidas de la simulación (Roa, P., Morales, C., & Gutiérrez, P., 2015).

## 4. Metodología propuesta

La metodología se desarrolló en base a la estrategia de mejora continua Ciclo de Deming, también conocido como PHVA. En primer lugar, se debe establecer las actividades iniciales para desarrollar el proyecto. En esta fase, se deben planificar los objetivos, estrategias y métodos para llevar a cabo el objetivo principal propuesto. En este trabajo, se realizó una investigación para levantar la información necesaria y determinar los parámetros y variables a analizar. Seguido a esto, el ciclo PHVA continua con la segunda fase en donde se desea ejecutar la arquitectura de control mediante la investigación de sistemas multi-agentes para desarrollar el comportamiento del modelo. En la tercera fase, es decir, verificar y medir las acciones de las tareas ejecutadas, se va a comparar el modelo de simulación con la solución propuesta y la inicial para evaluar las tareas ejecutadas por las señales de control de tráfico y su incidencia en el flujo vehicular. Finalmente, en la última fase del ciclo se medirá el impacto de los modelos mediante un análisis estadístico e indicadores que permitirán observar los resultados concluyentes de la investigación.

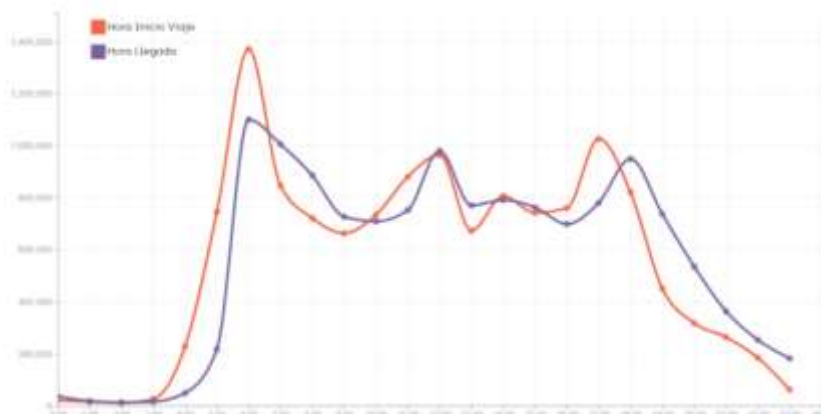
### 4.1. Parámetros, variables e indicadores del tráfico vehicular

El primer objetivo específico está alineado con el primer paso de la metodología PHVA. En este apartado se establecerán los parámetros, variables y datos de influencia necesarios para realizar la planeación robusta de la arquitectura de control.

Temáticas como la movilidad urbana y transporte colectivo han sido de gran relevancia para las ciudades, llegando a ser consideradas como elementos de primera necesidad colectiva (Salcedo et al, 2006). A lo largo de los años, Bogotá ha presentado incrementos en la adquisición de vehículos, esto se ha reflejado en situaciones donde el flujo vehicular colapsa hasta el punto de causar congestión en las vías. Rodrigo Fernández en el texto “Elementos de la teoría del tráfico” indica que las principales variables de estado en la corriente de tráfico son el **flujo** y la **velocidad media**. El término flujo se refiere a la cantidad de vehículos que pasan por un punto en específico durante un periodo de tiempo. Por otro lado, la velocidad media es el promedio de la velocidad de los vehículos que pasan por el mismo punto durante el mismo periodo de tiempo (Fernández, 2011).

De acuerdo con los Resultados de la Encuesta de Movilidad, en la capital se realizan 10 millones de viajes en vehículo por día. De las personas encuestadas, el 32.1% se transportan para cumplir con su horario laboral, siendo así la principal razón de transporte en la ciudad. Por esta razón, las denominadas horas pico suceden en el inicio, descanso y final de la jornada laboral de la mayoría de los ciudadanos. De acuerdo con estos resultados, se puede observar que **la franja horaria** también es un factor que influye en el comportamiento del tráfico vehicular, A continuación, se presenta el comportamiento del flujo vehicular por horas entre semana en Bogotá (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2019):

**Figura 2**  
*Comportamiento del flujo vehicular por hora en Bogotá*



Nota. Tomado de *Resultados de la Encuesta de Movilidad de Bogotá y municipios (2019)*.



El comportamiento del tráfico también depende de otros factores que influyen directamente en el flujo vehicular. En primer lugar, **las características físicas de la vía** como lo son la cantidad de carriles o la calidad del pavimento pueden ser causa de tráfico. Bogotá cuenta con más de 40 obras enfocadas en la mejora de la condición de los carriles. Sin embargo, la infraestructura de la ciudad aún cuenta con fallas que han generado el incremento en el tiempo de viajes (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015). En segundo lugar, **las condiciones del medio ambiente** como lo son el clima también se relacionan al aumento de la capacidad de saturación en las vías (Fernández, 2011).

La velocidad y la distancia suelen ser los principales determinantes del tiempo de viaje en un escenario donde el flujo vehicular sea constante. La Alcaldía Mayor de Bogotá estableció como límite máximo de velocidad en la ciudad 50 km/h para todos los vehículos. Los fundamentos teóricos indican que la velocidad y el flujo no tienen una relación lineal. Sin embargo, de acuerdo con el programa de gestión de la velocidad en su estudio sobre la relación entre el flujo y la velocidad del tránsito en la ciudad, reducir los límites de velocidad no tiene un impacto negativo en la congestión vehicular. Incluso, reducir la velocidad en algún caso podría tener impactos positivos en la congestión vehicular al disminuir el índice de accidentalidad (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2019). Battolla et al indican que las **características de los conductores** como lo es el nivel de estrés o la edad pueden impactar en la velocidad de los vehículos y generalmente en la generación de tráfico (Batolla et al, 2018).

La **ocupación del sistema de transporte público** en Bogotá es un factor que afecta en gran parte a la movilidad en la ciudad. En el 2015 se implementó en distintas vías de la ciudad un carril preferencial para los buses articulados, generando así mayor congestión para los vehículos particulares sin contar las vías que ahora son ocupadas por el sistema de Transmilenio (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015). Adicionalmente, la **ocupación de otros medios de transporte** como lo son las motocicletas y bicicletas también tienen un efecto al comportamiento del tráfico. De acuerdo con la encuesta de movilidad, las localidades con más porcentaje de utilización de motocicletas se encuentran en Bosa, Kennedy y Tunjuelito. Estas zonas representan un tiempo promedio de viaje de entre 60 a 90 minutos, siendo de los más altos en la ciudad según la plataforma Uber Movement.

La eficiencia en el tráfico se mide por la fluidez con la que los usuarios pueden circular a través de él. La teoría del tráfico expone 3 indicadores que evalúan la eficiencia del funcionamiento de un dispositivo vial (Fernández, 2011):

1. **La cantidad de detenciones:** Este indicador señala el estado de la circulación vehicular. A menor cantidad de detenciones, mejor será el flujo. Las interacciones entre vehículos también pueden producir este efecto, en especial entre vehículos que circulan en el mismo sentido, pero con diferentes velocidades.
2. **El tamaño de las colas:** Este indicador señala la cantidad de autos en espera. Un menor grado de saturación indica un comportamiento más adecuado.
3. **Espera en las colas:** Este indicador señala el tiempo promedio que esperan los autos en la cola. El estado de circulación es mejor entre menor sea el tiempo de espera de los vehículos.

El comportamiento de los semáforos impacta directamente en los tres indicadores debido a las colas que genera. En Bogotá, los tiempos de la mayoría de los semáforos se programan de manera fija a lo largo de todo el año y varían dependiendo del día y la hora (Bustamente, 2018). El **cambio a semáforos inteligentes** tendría un efecto directo en el comportamiento del tráfico, el cual se podría evaluar con los indicadores señalados en las colas presentadas por estos dispositivos.

La zona de estudio elegida abarca desde la calle 100 con autopista hasta la calle 127. El área está ubicada en la localidad de Usaquén y en la unidad de planteamiento zonal Santa Bárbara. En el área se encuentran distribuidos en total 26 semáforos convencionales. Según datos obtenidos por medio de la plataforma Uber Movement (Ver Anexo A), en la zona de estudio el pico más alto de tráfico ese presenta entre el medio día y entre las 5:00pm a 7:00pm, siendo este último el más. En donde, el tiempo de viaje promedio desde la calle 100 con autopista hasta la calle 127 en el año 2019 fue de hasta 19.1 minutos.

En este trabajo, se eligieron los siguientes aspectos para considerar en el modelo: Flujo, franja horaria, cantidad de detenciones, tamaño de las colas generadas por los semáforos, el tiempo de espera de estas colas y tipo de semáforo. Esto se identificó a partir de una evaluación conjunta con el director del trabajo de grado, en donde el criterio de decisión fue la posibilidad de poder modelar cada factor en el programa de simulación teniendo en cuenta el tiempo, facilidad de programación y la cantidad de información recolectada. El flujo y la franja horaria actuarán como parámetros los cuales variarán con el fin de analizar el impacto en los tres indicadores previamente mencionados.

Los indicadores elegidos permiten evaluar la eficiencia del tráfico vehicular bajo 3 variables diferentes. Con base en la revisión literaria realizada, para esta investigación se eligió el indicador **tiempo de espera promedio en las colas** como el principal criterio de decisión para medir el impacto de la semaforización en el modelo. La razón principal es debido a que dos de las principales consecuencias del tráfico (Aumento de contaminación y estrés de los conductores) son causadas por el tiempo adicional de espera en congestión. Adicionalmente, el indicador cantidad de detenciones puede verse afectado por otros factores además del tráfico, como lo son las señalizaciones de tránsito o estaciones del transporte público. En consecuencia, para este trabajo de grado se estableció un peso del 40 % para el indicador de tiempo promedio de espera en colas y, para los indicadores de número de detenciones promedio y número promedio de autos en cola se estableció un peso del 30% para cada uno.

#### 4.2. Construcción de la arquitectura de control

El segundo objetivo específico responde al segundo paso de la metodología PHVA en donde a partir de la información recolectada en el numeral anterior se realizará una arquitectura de control para definir el mejor comportamiento del tráfico vehicular en base a diferentes cambios en la conducta de los semáforos.

##### 4.2.1. Descripción de los Agentes modelados:

De acuerdo con las variables encontradas en el primer objetivo, se establecieron los agentes y atributos del sistema:

**Tabla 2**  
Descripción de los agentes

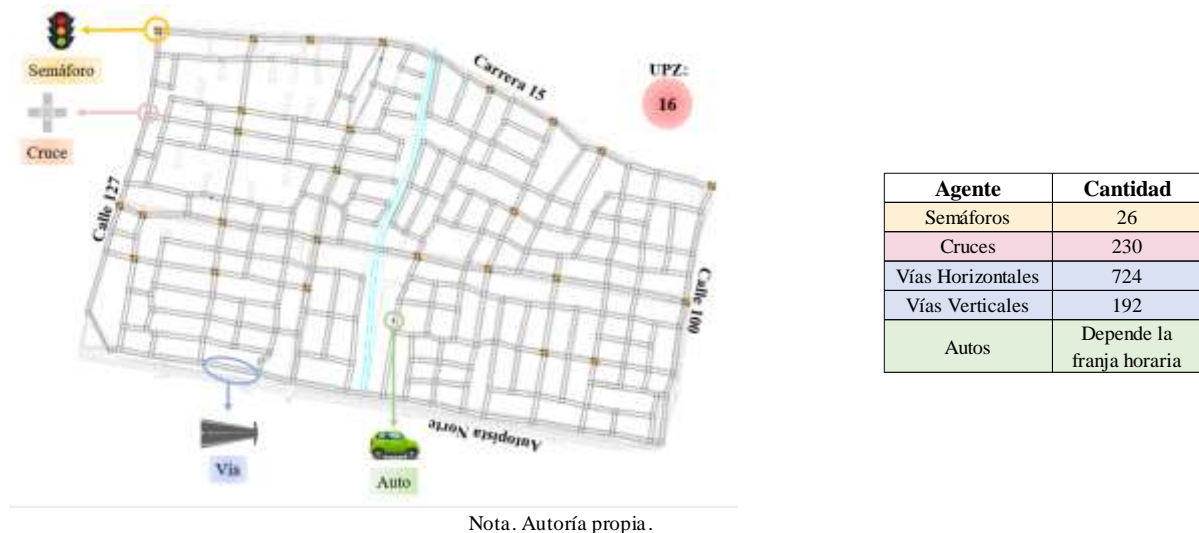
Agente		Descripción
Auto	Atributos	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Distancia recorrida.</li> <li>•Tiempo en el recorrido.</li> <li>•Velocidad del auto.</li> <li>•Seguir (Si/No): Indica si el auto sigue su camino o debe esperar.</li> <li>•Coordenadas actuales.</li> <li>•Tiempo de espera en el semáforo.</li> </ul>
	Información registrada del ambiente	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Estado del semáforo.</li> <li>•Auto en frente.</li> </ul>
	Comportamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Avanzar: Lo hace si no tiene ningún auto en su espectro de visión en frente de el y si se encuentra en el límite previo al semáforo cuando su estado es verde.</li> <li>•Frenar: Lo hace si tiene un auto en su espectro de visión y si se encuentra en el límite previo al semáforo cuando su estado es rojo.</li> </ul>
Semáforo	Atributos	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Estado: Verde (Permite el flujo) o rojo (Impide el flujo).</li> <li>•Tiempo mínimo en verde.</li> </ul>
	Información registrada del ambiente	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Cantidad de autos en su espectro de visión.</li> <li>•Tiempos de espera de los autos.</li> </ul>
	Comportamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Tiempo fijo: Su estado cambia de acuerdo a un tiempo establecido.</li> <li>•Tiempo variable/Inteligente: Lo realiza a partir de la información sensada en el ambiente.</li> </ul>
Cruces	Atributos	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Conexión con cada vía.</li> </ul>
	Información registrada del ambiente	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Cantidad de autos en su espectro de visión.</li> </ul>
	Comportamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Permite el movimiento de los agentes autos entre las vías de la zona.</li> </ul>
Vías	Atributos	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Distancia entre cruces.</li> <li>•Dirección de la vía.</li> </ul>
	Información registrada del ambiente	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Cantidad de autos en la vía.</li> </ul>
	Comportamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Son agentes estáticos que permiten el movimiento de los autos para llegar a los cruces.</li> </ul>

Nota. Autoría propia.

El plano utilizado para el modelo se realizó en base al mapa real de la zona de estudio, lo cual permitió situar la misma cantidad de cruces y semáforos. El modelo cuenta en total con 26 cruces especiales y 230 cruces normales, los cuales están conectados entre sí con 724 vías horizontales y 192 verticales. Los autos se desplazan por medio de estas vías, y su camino es establecido a partir de un algoritmo Dijkstra respecto al peso de los carriles.

La construcción del plano se hizo por medio de la herramienta AUTOCAD, en donde se establecieron las mismas distancias y vías encontradas en Google Maps. Se consideró este mapa porque cuenta con actualizaciones de calles y vías a tiempo real, lo cual permitiría una mayor precisión a la realidad. A continuación, se presenta el plano en Netlogo:

**Figura 3**  
Plano de la zona elegida



#### 4.2.2. Objetivo de la Arquitectura de Control

El objetivo de la Arquitectura de control es la recolección de datos a partir del comportamiento entre los agentes y su impacto en la variable de estudio. En este trabajo los datos se recolectarán a partir de los atributos y la información registrada en el ambiente de los agentes, esto con el fin de analizar el impacto en el tráfico vehicular. Adicionalmente, se modelarán diferentes escenarios para validar la eficiencia de la Arquitectura de control.

El criterio para medir el impacto de los escenarios establecidos se hará a partir del cálculo de los tres indicadores previamente mencionados en el objetivo específico 1:

1. Tiempo de espera promedio en las colas.
2. Tamaño promedio de las colas en los cruces especiales.
3. Cantidad de detenciones promedio por los autos.

El indicador Tiempo de espera en cola será el de mayor peso al momento de definir la política con mejor desempeño, no obstante, se espera tener una relación entre los tres indicadores. Este criterio permitirá hacer un ranking entre las diferentes políticas propuestas, siendo la mejor aquella con los mejores resultados en los indicadores. La recolección de datos para evaluar los indicadores se hará por medio de la plataforma de Netlogo, en donde a partir del modelo de simulación diseñado se obtendrá la información necesaria para el análisis. El funcionamiento de la plataforma permite descargar los datos de cada agente después de completar el tiempo total de la simulación.

#### 4.2.3. Interacción con otros sistemas

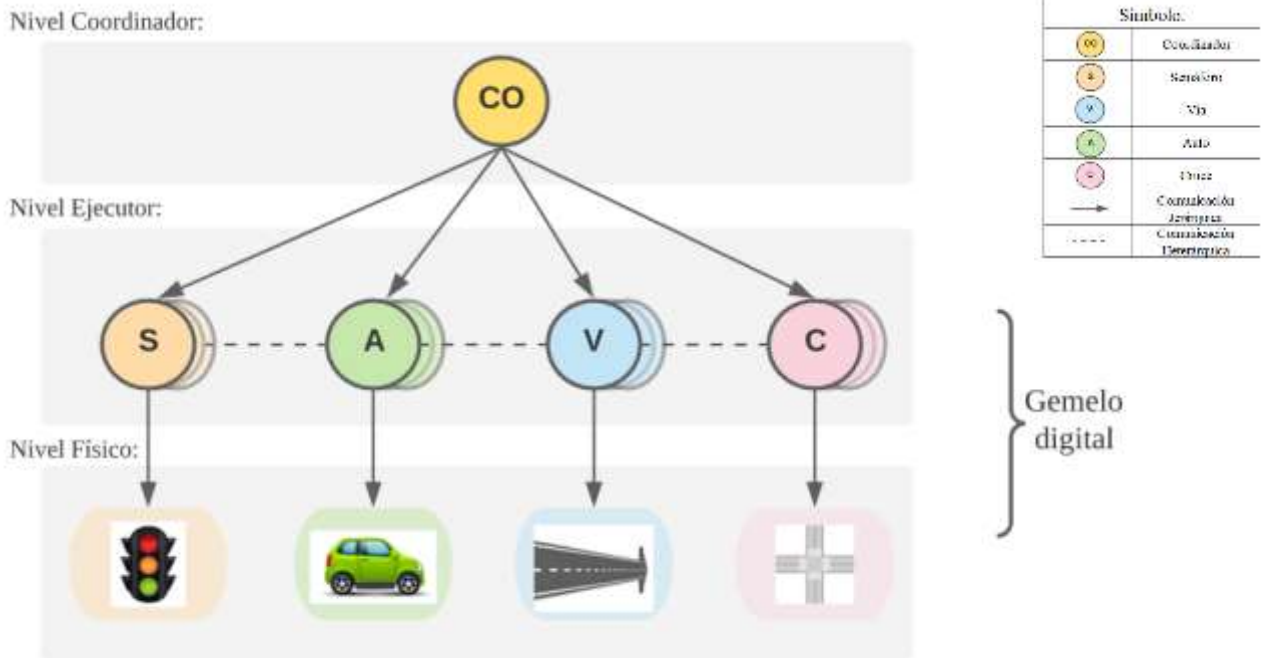
El sistema multi-agente viene dado a partir de una condición recursiva, en donde la función de interacción permite modelar comunicaciones entre un agente con otros agentes y con el entorno (Boggino, 2005). Esta condición permite que el sistema diseñado pueda interactuar con otros sistemas sin afectar su funcionalidad. El alcance de este trabajo de grado se limita a ver las interacciones dentro del sistema multi-agente propuesto. Sin embargo, la función de interacción vendría dada de las siguientes maneras:

1. Flujo de autos: Relación entre autos que vienen de un sistema diferente con un destino dentro de la zona de estudio o autos generado dentro del área con un destino fuera de los límites.
2. Comunicación entre los semáforos cercanos a los límites de dos zonas: Las señales de control de tráfico cercanas al límite pueden generar un incremento en el flujo vehicular, provocando así que los semáforos de la otra zona cambien su comportamiento a partir de la comunicación entre ellos.

#### 4.2.4. Estructura de la Arquitectura de Control

La estructura general de este modelo se muestra en la figura 4, la cual está basada en la arquitectura de control propuesta por Jimenez et al. La arquitectura de control se demuestra en tres tipos de niveles: Coordinador, ejecutor y físico (2016). El primer nivel viene dado por un agente de control interno, el cual se encarga de revisar toda la información del sistema para tomar decisiones y buscar una efectividad global. El segundo nivel contiene los agentes virtuales que se comunican entre si para desarrollar un funcionamiento colectivo. Por último, el nivel físico correspondería a los objetos físicos que representarían las tareas llevadas a cabo por los agentes en la simulación, cumpliendo su función como un gemelo digital.

**Figura 4**  
Estructura general de la arquitectura de control



Nota. Autoría propia.

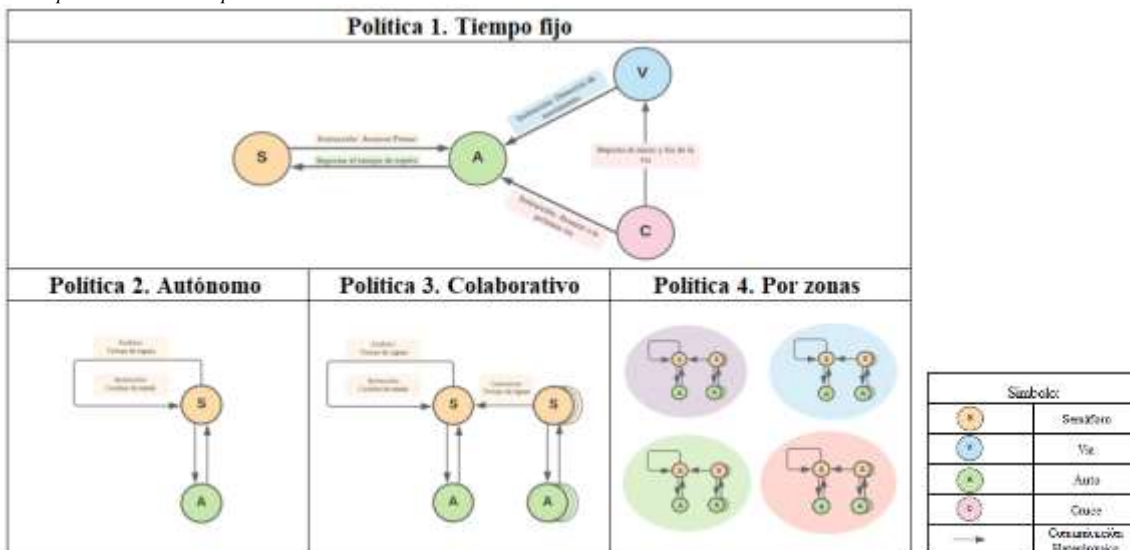
En este trabajo se analizará únicamente el nivel ejecutor. La estructura del sistema viene dada de manera heterárquica, ya que todos los agentes ejecutores cooperan entre ellos para alcanzar los objetivos globales establecidos. Los modelos heterárquicos se basan en una autonomía completamente local al establecer esquemas de comunicación entre los diferentes elementos, los cuales interactúan como iguales (Aguilar et al, 2012). Este modelo prohíbe la generación de jerarquías en el sistema, lo cual brinda una mayor flexibilidad y un mejor desempeño ante cambios.

#### 4.2.5. Comportamiento de la Arquitectura de Control

El comportamiento global de todo el sistema depende del comportamiento emergente que resulta a partir de los comportamientos individuales de cada uno de los agentes. En este trabajo, se evaluarán 4 políticas diferentes de los semáforos con el fin de determinar el mejor comportamiento del agente en relación con el sistema. Las políticas por evaluar son:

1. **Semáforos con comportamiento de tiempo fijo:** En este escenario los semáforos no interactúan de ninguna manera entre ellos y su cambio de estado (Verde/Rojo) viene dado por un tiempo establecido, sin importar la longitud de la cola en las vías.
2. **Semáforos con comportamiento inteligente y autónomo:** En este escenario los semáforos no interactúan entre ellos y consideran la cantidad de vehículos que están esperando en su vía. El peso de la vía se da a partir del total de autos detenidos antes de cruzar la intersección de cada semáforo. El algoritmo hará que la luz del semáforo cambie a verde cuando la suma del peso de las vías horizontales sea mayor a la suma del peso de las vías verticales y viceversa. No obstante, se considera un tiempo de espera mínimo entre cada cambio de estado del semáforo por lo que, los semáforos no pueden cambiar de estado hasta que ese tiempo se haya cumplido.
3. **Semáforos con comportamiento inteligente y colaborativo:** En este escenario los semáforos si interactúan entre ellos y se considera la cantidad de vehículos esperando en su vía. El algoritmo hará que los semáforos cambien de estado cuando haya al menos un semáforo en el cual la suma del peso de sus vías horizontales y verticales sean mayor a un número establecido. Sin embargo, se considera un tiempo mínimo y máximo de espera entre cada cambio de semáforo con el fin de asegurar que a pesar de un bajo flujo de vehículos los semáforos van a cambiar de estado.
4. **Semáforos con comportamiento inteligente, colaborativo y por segmentos:** En este escenario los semáforos interactúan entre ellos, pero por segmentos. Para esto, se definieron 4 segmentos distintos en los cuales hay un grupo específico de semáforos y un semáforo que coordinará a los demás del segmento. Para este escenario, el algoritmo hará que los semáforos del segmento cambien de estado cuando el peso de la suma de sus vías horizontales y verticales del semáforo coordinador sea mayor a un número establecido. No obstante, se considera un tiempo mínimo y máximo de espera entre cada cambio de semáforo con el fin de asegurar que a pesar de un bajo flujo de vehículos los semáforos van a cambiar de estado.

**Figura 5**  
Comportamiento de las políticas establecidas



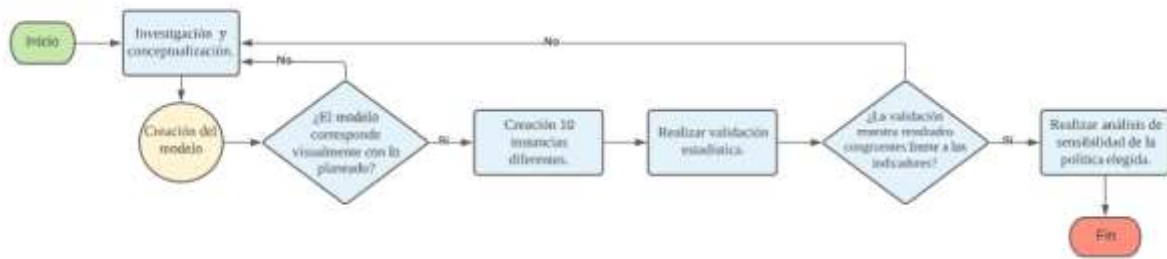
Nota. Autoría propia.

El comportamiento entre las políticas difiere en la comunicación entre los agentes semáforo y auto, la relación entre los agentes vías, cruces y autos se mantiene igual en cada uno de los escenarios. Los semáforos cuentan con un nivel de inteligencia y colaboración diferentes en cada escenario, generando que la cantidad de información compartida entre ellos pueda variar entre agentes. La **política 1** cuenta con el comportamiento de los semáforos convencionales en donde no existe ningún tipo de comunicación entre ellos, por esta razón estos no registran el tiempo de espera. Sin embargo, en la **política 2** los semáforos deben tomar esta información ya que es uno de sus criterios de decisión para cambiar de estado y permitir el flujo de autos. Por otro lado, en la **política 3** los semáforos se deben comunicar entre ellos para indicar que todos deben cambiar de estado si en alguno de ellos se cumplen los criterios de decisión para el cambio de estado. Finalmente, en la **política 4** los semáforos se comunicarán únicamente con los otros en su sección.

#### 4.3. Validación del modelo propuesto

El tercer objetivo específico responde al tercer paso de la metodología PHVA, en donde a partir de los datos obtenidos en el modelo de simulación se verificarán los resultados obtenidos. En la simulación de sistemas multi-agentes la validación es esencial, debido a que determina la capacidad que tiene el modelo para producir resultados lo suficientemente confiables para responder preguntas dirigidas al sistema original (Klugl,2008). El propósito de la validación de este modelo es contrastar los resultados de las 4 políticas propuestas a partir de la variación del flujo de autos tomando como referencia los 3 indicadores elegidos. La metodología para la validación se muestra en la figura 6:

**Figura 6**  
Metodología para la validación



Nota. Autoría propia.

##### 4.3.1. Desarrollo del modelo

El modelo de simulación propuesto cuenta con 18 franjas horarias que comprenden desde las 6:00 am hasta las 12:00 pm. En cada franja horaria el porcentaje de ocupación de autos en las vías varía según los datos encontrados en la plataforma de Uber Movement. A partir de esta información, se crearon 10 instancias en donde el flujo vehicular era diferente, para así obtener más tratamientos y detectar la influencia de las políticas y del flujo vehicular en los 3 indicadores. Adicionalmente, se definió el problema propuesto como se muestra a continuación:

El conjunto de Cruces  $C = \{ 1, 2, 3 \dots c \}$  se localizan a los finales de las cuadras y se encargan de proporcionar la dirección correcta de giro en el sentido de las vías. Adicionalmente existe un subconjunto de Especiales  $S = \{ 1, 2, 3 \dots s \} \subset C$  que contiene los cruces en donde hay un semáforo. Por un lado, cada cruce  $c \in C$  tiene un estado  $E_c$ : *Black, Green, Red*. Cada cruce especial  $s \in S$  tiene como posibles estados *Green* o *Red*, mientras que los demás cruces tienen como único estado *Black*. Así mismo, cada cruce tiene el color representativo al estado en el que se encuentre, es decir, si el cruce se encuentra en estado *Green* el color de este cruce será verde. Por otro lado, cada cruce especial  $s \in S$  tiene un número de autos en la vía  $N_s$  el cuál indica la cantidad de autos que se encuentran en la vía de dirección al semáforo. El conjunto cuenta también con un número de autos promedio en cola del semáforo  $A_s$ . Por último, cada cruce especial  $s \in S$  cuenta el tiempo desde el último cambio  $U_s$  el cual indica el tiempo que ha pasado desde el último cambio de estado del semáforo.

Adicionalmente, existe un conjunto de Autos  $A = \{ 1, 2, 3 \dots a \}$  los cuales se desplazan de un cruce de origen hasta un cruce de destino. Los autos tienen un cruce de origen  $O_{ca}$  y uno de destino, por lo que, cada auto tiene un camino a seguir  $C_a$ , un cruce al que se dirige  $N_{ca}$  y un destino  $CF_{ca}$ . Adicionalmente, cada auto tiene el tick (unidad de tiempo en Netlogo) en el que fue creado durante la simulación  $TI_a$ , el tick en el que salió de la simulación  $TF_a$  al llegar a su destino, la distancia recorrida  $D_a$ , tiempo de duración de recorrido  $TR_a$ , el número de ticks en el que el auto estuvo quieto  $T_a$ , el estado del auto  $S_a$  el cual indica si el auto está *Quieto* o *En Movimiento* y el número de veces que el auto se detiene  $B_a$ .

En adición, existe un conjunto de Franjas horarias  $F = [1, 2, 3 \dots f]$  en donde se divide la simulación por horas teniendo en cuenta que cada franja  $f \in F$  horaria tiene un número de autos creados  $CH_f$ . También existe un conjunto de Vías  $V = [1, 2, 3 \dots v]$  las cuales van de un cruce  $c \in C$  a otro cruce  $c \in C$ . Cada vía  $v \in V$  tiene un peso asociado  $P_v$ .

Finalmente, el modelo cuenta con los parámetros constantes: número de ticks que equivalen a una hora  $TH$ , número de ticks que equivalen a un minuto  $TM$ , número de ticks en los que los autos estuvieron quietos  $TQ$ , número de autos creados durante toda la simulación  $CC$ , tiempo fijo de cambio de estado del semáforo  $TP1$ , tiempo de espera mínimo entre cada cambio de estado del semáforo para la política 2  $TP2$ , tiempo de espera mínimo entre cada cambio de estado del semáforo para la política 3  $TP3$  y tiempo de espera mínimo entre cada cambio de estado del semáforo para la política 4  $TP4$ .

### Formulación del modelo:

#### Conjuntos

$C$	Conjunto de cruces; $c \in C$
$S$	Subconjunto de cruces especiales (semáforos); $s \in S$ ; $S \subset C$
$A$	Conjunto de autos; $a \in A$
$F$	Conjunto de franjas horarias; $f \in F$
$V$	Conjunto de vías; $v \in V$

#### Parámetros

$E_c$	Estado del cruce $C$
$N_s$	Número de autos en la vía dirigida al semáforo o cruce especial $s$
$U_s$	Último cambio de estado del semáforo o cruce especial $s$
$A_s$	Número de autos promedio en cola del semáforo o cruce especial $s$
$C_a$	Camino a seguir del auto $a$
$N_{ca}$	Cruce $c$ al que se dirige el auto $a$
$CF_{ca}$	Cruce $c$ de destino del auto $a$
$O_{ca}$	Cruce $c$ de origen del auto $a$
$TI_a$	Tick en el que se creó el auto $a$
$TF_a$	Tick en el que el auto $a$ sale de la simulación (llega a su destino)
$D_a$	Distancia recorrida por el auto $a$
$TR_a$	Tiempo de duración del recorrido del auto $a$
$S_a$	Estado del auto $a$
$B_a$	Número de veces que se detiene el auto $a$ hasta llegar a su destino
$CH_f$	Número de autos creados en la franja horaria $f$
$P_v$	Peso de la vía $v$
$TH$	Número de ticks en una hora
$TM$	Número de ticks en 1 minuto

- TQ*    Número de ticks en los que todos los autos escribieron quietos
- CC*    Número de autos creados durante toda la simulación
- TP1*    Tiempo fijo que pasa entre un estado de los semáforos a otro estado
- TP2*    Tiempo de espera mínimo entre cada cambio de estado del semáforo en la política 2
- TP3*    Tiempo de espera mínimo entre cada cambio de estado del semáforo en la política 3
- TP4*    Tiempo de espera mínimo entre cada cambio de estado del semáforo en la política 4

Función Fitness:

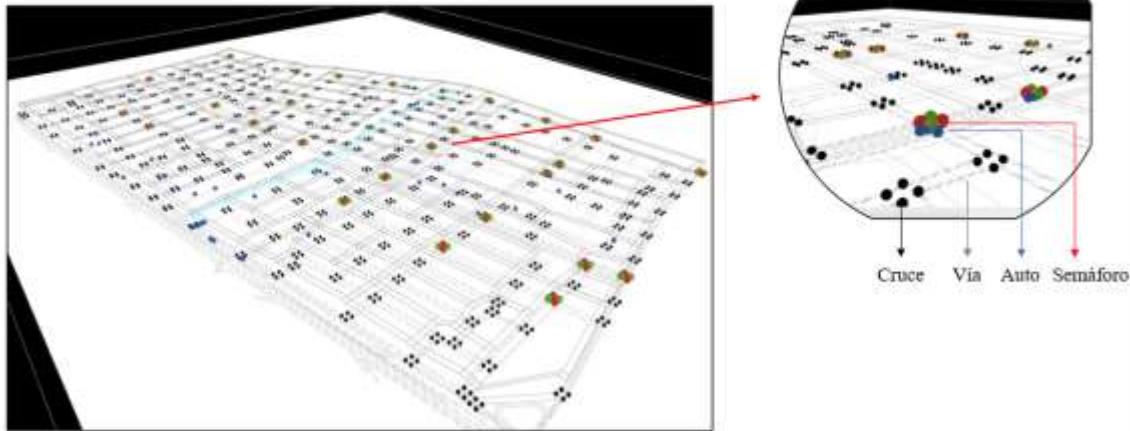
$$\text{Min } z = \sum_{v,s} A_s \tag{1}$$

$$\text{Min } z = \sum_{v,a} B_a \tag{2}$$

$$\text{Min } z = \sum_{v,a} \frac{T_a}{TM} \tag{3}$$

La construcción del modelo se realizó en el software Netlogo, en la figura 7 se presenta el plano de la zona elegida junto a los agentes descritos anteriormente. Las esferas de color negro representan los cruces, las esferas de color verde/rojo corresponden a los semáforos con su estado y los agentes azules son los autos que se desplazan por el plano.

**Figura 7**  
*Modelo de simulación en Netlogo*



Nota. Tomado de Netlogo

En la figura 8 se muestra la pantalla de Netlogo con cada uno de los elementos de la interfaz explicada. Las variables *SumaAutosEnSemaforoP3* y *SumaAutosEnSemaforoP4*, corresponden a uno de los criterios del máximo valor de la suma de los pesos de las vías del semáforo para la política 3 y 4 respectivamente. La variable *t1*, corresponde al tiempo establecido para el cambio de estado del semáforo en la política 1 y las variables *t2*, *t3* y *t4* corresponden al criterio de tiempo mínimo de espera desde el último cambio de las políticas 2, 3 y 4 respectivamente. Adicionalmente, en el Anexo B se presenta el video de Netlogo con el modelo completo.



**Figura 8**  
Modelo de simulación en Netlogo



Nota. Tomado de Netlogo

#### 4.3.2. Diseño de experimentos

Con el fin de realizar la validación estadística del modelo se realizó un diseño de experimentos compuesto por 4 tratamientos (4 políticas), 10 bloques (diferentes días de flujo de autos) y 3 variables de respuesta (tiempo de espera en cola, número de autos en cola y número promedio de detenciones del auto). Debido a esto se definió que el modelo a seguir para cada una de las variables de respuesta es el diseño en bloques completamente al azar (DBCA) con una significancia del 0.05. El modelo lineal de los errores se muestra a continuación:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad (4)$$

Donde  $\mu$  es la media global del modelo,  $\tau_i$  el efecto del tratamiento  $i$ ,  $\beta_j$  el efecto del bloque  $j$  y  $\varepsilon_{ij}$  es el atribuido a la medición del tratamiento  $i$  y del bloque  $j$ . Adicionalmente, las hipótesis asociadas con este modelo son:

$$\begin{aligned} H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_i \\ H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \dots \neq \mu_i \end{aligned} \quad (5)$$

La prueba paramétrica DBCA se eligió a partir de la verificación de los supuestos de **normalidad, homogeneidad e independencia** con la ayuda del software estadístico SPSS. En primer lugar, se realizó la prueba de normalidad Shapiro-Wilk debido a que el tamaño de los datos ( $n$ ) es menor a 50 (Saldaña, 2016) y se estableció una significancia del 0,05. Las hipótesis de este supuesto son:

$$\begin{aligned} H_0: \text{Los datos siguen una Distribución Normal} \\ H_1: \text{Los datos no siguen una Distribución Normal} \end{aligned} \quad (6)$$

En la tabla 3 y 4 se encuentran los resultados correspondientes a la prueba de normalidad de las políticas y las instancias, dando como resultado en todas las variables de respuesta un p-valor mayor a 0,05. Por esta razón, se rechaza la hipótesis  $H_1$  y se concluye que los datos siguen una distribución normal.

**Tabla 3**  
Prueba de normalidad políticas

Shapiro-Wilk Políticas		
Variable de respuesta	Política	P-Value
Tiempo de espera promedio en cola	1	0,136
	2	0,939
	3	0,567
	4	0,927
Promedio de autos en cola	1	0,657
	2	0,554
	3	0,878
	4	0,867
Número promedio de Detenciones	1	0,692
	2	0,739
	3	0,590
	4	0,349

Nota. Tomado de SPSS

**Tabla 4**  
Prueba de normalidad instancias

Shapiro-Wilk Instancias					
Tiempo de espera promedio en cola		Promedio de autos en cola		Número promedio de Detenciones	
Instancia	P-Value	Instancia	P-Value	Instancia	P-Value
1	0,810	1	0,428	1	0,248
2	0,385	2	0,265	2	0,757
3	0,894	3	0,760	3	0,067
4	0,604	4	0,997	4	0,642
5	0,669	5	0,191	5	0,601
6	0,746	6	0,510	6	0,314
7	0,880	7	0,763	7	0,302
8	0,300	8	0,055	8	0,801
9	0,215	9	0,793	9	0,237
10	0,689	10	0,146	10	0,137

Nota. Tomado de SPSS

En segundo lugar, se realizó el supuesto de homogeneidad a partir de la prueba de Levene, en donde se evalúa si las desviaciones medias con iguales o diferentes entre ellas a partir de una significancia establecida de 0,05. Las hipótesis de este supuesto son:

$$\begin{aligned}
 H_0: \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \dots = \sigma_i \\
 H_1: \sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3 \neq \dots \neq \sigma_i
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

En la tabla 5 se encuentran los resultados correspondientes a la prueba de homogeneidad de las políticas y las instancias, dando como resultado en todas las variables de respuesta un p-valor mayor a 0,05. Por esta razón, se rechaza la hipótesis  $H_1$  y se concluye que las desviaciones son iguales para los tratamientos e instancias. Adicionalmente, Los gráficos de normalidad correspondientes junto con las pruebas de normalidad y homogeneidad mencionados anteriormente se muestran en el Anexo C.

Una vez comprobados estos supuestos se realizó la prueba paramétrica de diseño de bloques completamente aleatorio con una significancia de 0,05. Los resultados obtenidos son mostrados en la tabla 6, dando como resultado un p-valor menor a la significancia establecida. Por esta razón, se rechaza la hipótesis nula  $H_0$  y se concluye que si existe diferencia significativa entre el promedio de las variables de respuesta para las diferentes políticas y para las diferentes instancias.

**Tabla 5**  
Prueba de homogeneidad

Prueba de Levene		
Variable de respuesta	Políticas	Instancias
	P-Value	P-Value
Tiempo de espera promedio en cola	0,997	0,959
Promedio de autos en cola	0,980	0,975
Número promedio de Detenciones	0,980	0,972

Nota. Tomado de SPSS

**Tabla 6**  
Prueba paramétrica DBCA

Prueba DBCA		
Variable de respuesta	Políticas	Instancias
	P-Value	P-Value
Tiempo de espera promedio en cola	0,00	0,01
Promedio de autos en cola	0,02	0,00
Número promedio de Detenciones	0,00	0,00

Nota. Tomado de SPSS

Con base a los resultados obtenidos en el diseño de bloques completamente al azar o ANOVA de dos factores, se realizó la prueba HSD de Tukey en donde se comparan todos los pares de medias de los distintos tratamientos (Dagnino, 2014):

$$\begin{aligned} H_0: \mu_i &= \mu_j & \forall i \in I, \forall j \in I, i \neq j \\ H_1: \mu_i &\neq \mu_j & \forall i \in I, \forall j \in I, i \neq j \end{aligned} \quad (8)$$

Los resultados de esta prueba en la cual se estableció una significancia de 0,05 para los indicadores y las políticas son mostrados en la tabla 7. Para los p-valores cuya significancia es menor a 0,05 se rechaza la hipótesis nula  $H_0$  y se concluye que sí existe una diferencia significativa entre las medias de las variables de respuesta y las políticas comparadas. Adicionalmente, Los resultados para el diseño de bloques completamente al azar y las pruebas de Tukey para cada uno de los indicadores con las políticas y las instancias son mostrados en el Anexo D.

**Tabla 7**  
Prueba HSD de Tukey

Prueba HSD de Tukey							
Indicador:	Tiempo de espera promedio en cola		Promedio de autos en cola		Número promedio de Detenciones		
	(I) Política	(J) Política	P-Value	(J) Política	P-Value	(J) Política	P-Value
1		2	0,221	2	0,395	2	0,001
		3	0,028	3	0,809	3	0,987
		4	0,000	4	0,000	4	0,075
2		1	0,221	1	0,395	1	0,001
		3	0,000	3	0,084	3	0,002
		4	0,000	4	0,004	4	0,282
3		1	0,026	1	0,809	1	0,967
		2	0,000	2	0,084	2	0,002
		4	0,000	4	0,000	4	0,143
4		1	0,000	1	0,000	1	0,075
		2	0,000	2	0,002	2	0,282
		3	0,000	3	0,000	3	0,143

Nota. Tomado de SPSS

La prueba Tukey también forma subconjuntos homogéneos para cada variable de respuesta, estos son mostrados a continuación en la tabla 8. A partir de esta información se eligió la política con mejor desempeño para cada uno de los criterios:

**Tabla 8**  
Subconjuntos de la prueba HSD Tukey

Subconjuntos HSD Tukey							
Política	Tiempo de espera promedio en cola			Promedio de autos en cola		Número promedio de Detenciones	
	1	2	3	1	2	1	2
1		2,77			6,01	2,23	
2		2,88			6,20		2,63
3	2,59				5,66	2,20	
4			3,28	4,72			2,45

Nota. Tomado de SPSS

**Tiempo de espera promedio en cola:** De acuerdo con la información extraída de SPSS, la política que obtuvo un menor tiempo de espera promedio fue la *tercera*. Esto indica que la implementación de semáforos inteligentes y colaborativos podría tener una mayor influencia en la disminución de tiempo de espera que los demás tipos de semáforos propuestos. Adicionalmente, disminuir el tiempo de espera genera una reducción en la producción de gases contaminantes puesto que el auto estaría menos tiempo encendido.

**Promedio de autos en cola:** De acuerdo con la información extraída de SPSS, la política que obtuvo un menor promedio de autos en cola fue la *cuarta*. Esto indica que la implementación de semáforos inteligentes y colaborativos por segmentos podría tener una mayor influencia en la disminución de la longitud de la cola que los demás tipos de semáforos propuestos.

**Número promedio de detenciones:** De acuerdo con la información extraída de SPSS, la política que obtuvo un menor tiempo de espera promedio fue la *tercera*. Esto indica que la implementación de semáforos inteligentes y colaborativos podría tener una mayor influencia en la disminución de detenciones por vía que los demás tipos de semáforos propuestos. Sin embargo, debido a que la política uno se encuentra en el mismo subconjunto de la política 3 y, por lo tanto, no existe una diferencia significativa entre el número promedio de detenciones entre estas políticas, por ende, no se podría establecer con certeza cuál de estas políticas es la mejor para este indicador.

#### 4.4. Análisis de la política elegida

El cuarto objetivo específico responde al cuarto paso de la metodología PHVA en donde a partir de los resultados obtenidos de la validación estadística se realizará un análisis de sensibilidad de la política elegida para así comprobar en diferentes escenarios el comportamiento del tráfico vehicular.

Con base en los resultados en las pruebas Post Hoc realizados anteriormente, se realizó un análisis de sensibilidad de los parámetros de la policía 3 debido a que, esta fue la política con menor tiempo promedio de espera en cola, el cual es considerado para este caso de estudio como el indicador de mayor relevancia e influencia en los resultados. Adicionalmente, la política 3 también obtuvo el menor número de detenciones promedio y, esta fue la política con mejor desempeño teniendo en cuenta el peso de cada uno de los indicadores y los resultados obtenidos en las pruebas estadísticas. A continuación, se muestra en la figura 8 el análisis de sensibilidad del parámetro del peso de las vías horizontales y verticales del semáforo y, en la figura 9 el análisis de sensibilidad del parámetro tiempo mínimo de ultimo cambio de estado del semáforo.

**Figura 8**

*Tiempo de espera en cola vs. Suma del peso de las vías del semáforo*



Nota. Autoría propia

**Figura 9**

*Tiempo de espera en cola vs. Tiempo mínimo de cambio semáforo*



Nota. Autoría propia

La suma de los pesos de las vías del semáforo es el parámetro que evalúa si el semáforo puede o no cambiar de estado. De acuerdo con la gráfica realizada en la figura 8 se establece que entre menor sea el valor establecido como el máximo valor de la suma de los pesos de las vías, menor es el tiempo promedio en cola. Mientras que, entre más alto sea el valor establecido, mayor será el tiempo promedio de espera en cola. Esto quiere decir que, en el comportamiento de los semáforos inteligentes se establece una mayor importancia a una menor cola en todos los cruces que a un tiempo prolongado en verde de una sola vía.

De acuerdo con la información suministrada en la figura 9, entre menor es el tiempo mínimo de espera desde el último cambio de estado, menor es el tiempo promedio de espera en cola. Mientras que, entre mayor sea el tiempo mínimo de espera desde el último cambio, mayor será el tiempo promedio de espera en cola de los

automóviles. Esto quiere decir que, en el comportamiento de los semáforos inteligentes entre menor sea tiempo mínimo de cambio de estado, mejor será el comportamiento del flujo vehicular.

## 5. Resultados

Gracias a la metodología utilizada para el desarrollo del trabajo, se obtuvo el cumplimiento de los 4 objetivos propuestos, dando como resultado la construcción de una arquitectura de control basada en un sistema multi-agente capaz de representar el comportamiento del tráfico vehicular. Si bien es cierto que el comportamiento vehicular se ve afectado por una amplia lista de factores, la investigación inicial permitió obtener los factores y los indicadores de mayor peso para el caso de estudio. Adicionalmente, a partir de la teoría del tráfico se eligieron los criterios de evaluación pertinentes para validar la eficiencia del sistema vehicular.

La correcta construcción de la arquitectura de control dio como resultado un diseño de simulación completo el cual pone en evidencia que es factible realizar una reducción en los tiempos de espera de un semáforo a partir de los cambios que pueda tener el comportamiento de este. La simulación multi-agente facilitó la representación del flujo vehicular en las intersecciones permitiendo asignar un comportamiento particular en los semáforos y establecer mejoras. Debido a la implementación del diseño, se pudieron desarrollar las siguientes conjeturas:

Al obtener los datos de entrada correspondientes a las variables evaluadas se identifica la existencia de la relación entre comportamiento vehicular y el comportamiento de los semáforos. Adicionalmente, la hora y el flujo vehicular impactan directamente en la generación de tráfico vehicular. En cuanto a la evaluación de indicadores, se obtiene que la política 3 cuenta con una mejor respuesta en cuando a la disminución de tiempo de espera promedio en colas como en el número de detenciones promedio de los autos en las vías. En la tabla 9 se observa la evaluación por indicador de las políticas:

**Tabla 9**  
*Ranking desempeño de las políticas por indicador*

Variable de respuesta	Políticas con mejor desempeño			
	1	2	3	4
Tiempo de espera promedio en cola	Segunda	Tercera	Primera	Cuarta
Promedio de autos en cola	Cuarta	Tercera	Segunda	Primera
Número promedio de Detenciones	Segunda	Cuarta	Primera	Tercera

Nota. Autoría propia.

Con base en los resultados obtenidos para el indicador de tiempo de espera promedio en cola, la política 3 reduce el tiempo promedio de espera en un 21,04% con respecto a la política 4 en donde, se obtuvo el tiempo de espera en cola más alto. Para el indicador de autos promedio en cola, la política 4 redujo en un 24,19% el promedio de autos en cola en comparación con la política 1 en donde se obtuvo el mayor valor para este indicador. Por último, para el indicador de número promedio de detenciones, la política 3 redujo en un 16,35% con respecto a la política 2, la cual obtuvo el mayor número promedio de detenciones.

En el análisis de sensibilidad realizado para la política 3 se evidenció que el criterio de la máxima suma del peso de las vías del semáforo y el mínimo tiempo de espera desde el último cambio de estado del semáforo tienen una relación directamente proporcional con el tiempo promedio de espera en cola de los automóviles. En consecuencia, entre menor valor tengan estos criterios, menor será el tiempo promedio de espera en cola.

### 5.1 Medición del impacto

Si bien es cierto que el alcance del trabajo de grado es hasta el nivel ejecutor y no al nivel físico, se demostró que los modelos multi-agentes pueden generar resultados y tomar decisiones en cuanto a la efectividad de un sistema propuesto. La simulación permite validar la propuesta y obtener su mejor configuración sin la necesidad

de evaluarlo directamente en el caso real. No obstante, los resultados demostraron la posibilidad de disminuir el tráfico vehicular en la zona, esto generaría un fuerte impacto en la ciudad:

En términos ambientales, el tráfico vehicular es un generador de contaminación ambiental debido a los gases que expulsan los autos en el rodaje y en el tiempo de espera en la congestión. Por otro lado, la contaminación acústica causada por el ruido de los automóviles es un factor que se comporta de manera directamente proporcional al aumento de la congestión en las vías. De acuerdo con cifras registradas por las Naciones Unidas, en el mundo mueren 3 millones de personas relacionadas con la exposición a la contaminación atmosférica (González, 2015). Por esta razón, al implementar un modelo de semaforización que permita la disminución del tráfico vehicular podría traer impactos positivos en la disminución de gases generados por los automóviles.

El impacto ambiental tiene una gran repercusión en la calidad de vida de los ciudadanos. Estudios científicos han relacionado la exposición a la contaminación atmosférica con el deterioro de la salud respiratoria y cardiovascular de las personas (Segura & Franco, 2016). De acuerdo con la revista *Environmental Health Perspectives* la contaminación acústica tiene un efecto directo en los niveles de estrés de los conductores y transeúntes (Adler, 2009). De acuerdo con estos datos, la disminución en el tráfico vehicular podría tener un impacto positivo en la calidad de vida de los ciudadanos.

El impacto del cambio de los semáforos convencionales en pro de un mejor flujo vehicular en las vías también tiene un impacto económico. Según una investigación realizada por la Alcaldía Mayor, en una ciudad como Bogotá que cuenta con una red semafórica que controla aproximadamente 1356 intersecciones en la ciudad, el cambio a una red que permita adaptar los tiempos de los semáforos acordes con las demandas de tráfico supone una inversión de más de 230,000 millones sin tener en cuenta el costo de la consultoría (Alcaldía Mayor de Bogotá DC, 2017).

Finalmente, el comportamiento del tráfico vehicular es un espectro que afecta el desarrollo económico y social de una ciudad. A medida que la población va incrementando, es necesario priorizar soluciones a problemas que afecten directamente en la salud de los habitantes.

## **6. Limitaciones, conclusiones y recomendaciones.**

El programa Netlogo fue una herramienta esencial para el cumplimiento de los objetivos propuestos. La plataforma cuenta con una gran cantidad de funciones que permiten el desarrollo completo de una simulación. Sin embargo, el conocimiento reciente del software supuso una limitación en cuanto a la cantidad de agentes presentes en el modelo. La dificultad de programación fue un criterio de importancia al momento de decidir qué parámetros y agentes participarían en la construcción de la arquitectura de control. Por otro lado, el tiempo de corrida de cada simulación era de aproximadamente de 45-50 minutos, lo cual no permitió hacer una mayor cantidad de pruebas para contemplar la calibración de los parámetros.

De la presente investigación se presentan las siguientes *conclusiones*:

La pregunta de investigación planteada: ***¿Cómo debería ser una arquitectura de control distribuida para representar y modelar un sistema inteligente de tráfico vehicular?*** Se logró resolver puesto que la arquitectura de control distribuida desarrollada brindó la información suficiente para modelar el sistema inteligente en Netlogo. Adicionalmente, de la simulación se obtuvieron los datos necesarios para explicar el comportamiento del tráfico vehicular de un sistema inteligente. Igualmente, la sub-pregunta de investigación ***¿Qué criterios de evaluación se deberían tener en cuenta en esta arquitectura de control para validar la eficiencia de esta misma sobre el sistema vehicular?*** Pudo solucionarse gracias a la teoría del tráfico vehicular, ya que de esta investigación se establecieron los 3 indicadores que evaluaron la eficiencia del sistema. Por otro lado, la validación estadística evidenció que sí había relación entre estos criterios y el sistema vehicular propuesto.

La simulación multi-agente describió la representación del flujo vehicular en las vías e intersecciones presentadas en el plazo de la zona elegida. Esto permitió representar y asignar a los semáforos comportamientos particulares para hallar el tiempo de espera, número de detenciones y cantidad de autos en la cola. El uso de la

simulación para validar la arquitectura de control fue una alternativa flexible y versátil, ya que permitió el cambio de las políticas en el mismo plano solo con ajustar el código inicial propuesto.

El software de simulación multi-agente Netlogo brindó una interfaz gráfica para el modelo lo suficientemente capaz de visualizar la interacción entre los agentes y la extracción de los datos de interés por agente. Los criterios de evaluación para evaluar la eficiencia del tráfico vehicular brindaron resultados significativos para determinar la mejor política. Sin embargo, no se encontró una relación directa entre los tres indicadores pues cada uno tuvo una respuesta diferente en cuando al comportamiento de las políticas.

El uso de la ingeniería industrial no se restringe a aplicaciones de tipo operativo y productivo, la carrera se extiende a todo tipo de problemáticas que pueden tener un impacto incluso a nivel social. El trabajo presentado utilizó herramientas como la simulación y el diseño de experimentos para representar una problemática con implicaciones de tipo social, académico y operativo.

La experiencia de este trabajo permitió hacer las siguientes **recomendaciones** a futuro:

Establecer la mayor cantidad de atributos a los agentes permitirá obtener más resultados en la aplicación de tecnologías multi-agentes para el estudio del tráfico vehicular. Es importante establecer al inicio la comunicación entre cada uno de los agentes para así generar soluciones factibles al objeto de estudio.

Realizar modelos del tráfico en donde se incluyan todos los tipos de medios de transporte de la zona de estudio y la participación de los conductores en el modelo. La presencia de estos agentes tendrá como resultado análisis más completos y realistas para explicar el comportamiento del tráfico vehicular en una ciudad.

Investigar en trabajos futuros las interacciones del sistema multi-agente con otros sistemas. Asimismo, evaluar la extensión del modelo a una red de tráfico más amplia con el fin de tener una visión más amplia del comportamiento general de tráfico y su efecto entre las distintas zonas de la ciudad.

Evaluar el comportamiento reflejado del nivel coordinador y del nivel físico en la arquitectura de control y su efecto directo en el nivel ejecutor. La visualización de todos los niveles de la arquitectura de control permitiría la implementación de la propuesta en la vida real.

## 8. Respecto a los Anexos o Apéndices

**Tabla 10**  
*Anexos del documento*

Anexo	Nombre	Desarrollo	Tipo de archivo	Enlace corto
A	Datos Uber Movement	Uber Movement	Excel	<a href="#">Anexo A</a>
B	Video de simulación Netlogo	Propio	.mov	<a href="#">Anexo B</a>
C	Pruebas de Normalidad y Levene	Propio	PDF	<a href="#">Anexo C</a>
D	Pruebas DBCA y Tukey	Propio	PDF	<a href="#">Anexo D</a>

Nota. Autoría propia.

## 9. Referencias

- Adler, T. (2009). Una relación compleja: estrés psicosocial, contaminación y salud. *Salud Pública de México*, 51(6), 524.
- Aguilar, J., BOLIVAR, A. R., Hidrobo, F., & Cerrada, M. (2012). *Sistemas MultiAgentes y sus Aplicaciones en Automatización Industrial*.
- Aguirre, H. R. O., Salas, S. L., & Moreno, V. M. L. (2018). SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES PARA EL CONTROL INTELIGENTE DE SEMÁFOROS MEDIANTE LÓGICA DIFUSA. *Pistas Educativas*, 39(128).
- Alawadhi, S., Aldama-Nalda, A., Chourabi, H., Gil-Garcia, J. R., Leung, S., Mellouli, S., ... & Walker, S. (2012, September). Building understanding of smart city initiatives. In *International conference on electronic government* (pp. 40-53). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Alexandres Fernández, S., Rodríguez-Morcillo García, C., & Muñoz Frías, J. D. (2006). RFID: La tecnología de identificación por radiofrecuencia.
- Alcaldía Mayor de Bogotá (2019). Programa de Gestión de la Velocidad.
- Alcaldía Mayor de Bogotá (2019). Resultados de la Encuesta de Movilidad de Bogotá y municipios.
- Alcaldía Mayor de Bogotá (2017). Semáforos inteligentes: ya se acerca el cambio de la red en la ciudad.
- ANGULO, D. P. S., Martín, J. J. D. B., & Melero, J. G. (2013). APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS EXPERTOS MULTIAGENTE A LA GESTIÓN SEMAFÓRICA DE LA CIUDAD DE VALLADOLID (ESPAÑA). *Revista de la Escuela Jacobea de Posgrado* <http://revista.jacobe.edu.mx>, (5), 21-44.
- Atta, A., Abbas, S., Khan, M. A., Ahmed, G., & Farooq, U. (2018). An adaptive approach: Smart traffic congestion control system. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*.
- Bú, R. C. (1994). *Simulación: un enfoque práctico*. Editorial Limusa.
- Battolla, T. F., Fuentes, S., Illi, J. I., Nacht, J., Falco, M., Pezzuchi, G., & Robiolo, G. (2018, September). Sistema dinámico y adaptativo para el control del tráfico de una intersección de calles: modelación y simulación de un sistema multi-agente. In *Simposio Argentino de Inteligencia Artificial (ASAI)–Jornadas Argentinas de Informática, Universidad de Palermo*.
- Boggino, A. S. G. (2005). ANEMONA: Una metodología multi-agente para sistemas holónicos de fabricación (Doctoral dissertation, PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia).
- Bull, A. (2003). *Congestión de tránsito: el problema y cómo enfrentarlo* (No. 87). United Nations Publications.
- Bustamante Atehortúa, J. C. Smart cities 5G: una implementación de la MTC para resolver el problema de tráfico en Bogotá (Bachelor's thesis, Uniandes).
- Camacho, J., Medina, S., & Terán, O. (2012). Simulación del tráfico de autos en una intersección: desde la perspectiva de una plataforma multiagente. *Ciencia e Ingeniería*, 33(2), 85-93.
- Camargo-Vega, J. J., Camargo-Ortega, J. F., & Joyanes-Aguilar, L. (2015). Conociendo big data. *Facultad de Ingeniería*, 24(38), 63-77.
- Campos, S. A., & Alcalá-Sánchez, I. G. (2011). La migración campo-ciudad, un grave problema social y educativo. *Construyendo inéditos viables*, 187.
- Castán, J. A., Ibarra, S., Laria, J., Guzmán, J., & Castán, E. (2014). Control de tráfico basado en agentes inteligentes. *Polibits*, (50), 61-68.
- Colín, C. A. N. (2018). Análisis de varianza no paramétrica: un punto de vista a favor para utilizarla. *Acta agrícola y pecuaria*, 4(3), 69-79.
- De Bogotá, C. D. C. (2015). *Estado de Bogotá Región: Documento maestro de diagnóstico sobre la situación, Propuestas y retos de Bogotá Región para pre candidatos a la Alcaldía Mayor de Bogotá ya la Gobernación de Cundinamarca*.
- Demoraes, F., Gouëset, V., & Luna, C. M. (2020). Características de la movilidad diaria en el Área Metropolitana de Bogotá, con base en la Encuesta de Movilidad de Bogotá 2019–Un panorama en mapas (Doctoral dissertation, UMR ESO, Espaces et Sociétés; Institut Français d'Etudes Andines).
- de Oca, J. A. M. M., Laglera, J. L. M., & Collado, J. C. (2007, September). Prediseño de Sistema de Gestión de Movilidad (SIGEMO). In *XI Congreso de Ingeniería de Organización* (pp. 1879-1887).
- Díaz, N., Guerra, J., & Nicola, J. (2018, October). Smart Traffic Light Control System. In *2018 IEEE Third Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)* (pp. 1-4). IEEE.



- Dorsemaine, B., Gaulier, J. P., Wary, J. P., Kheir, N., & Urien, P. (2015, September). Internet of things: a definition & taxonomy. In 2015 9th International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies (pp. 72-77). IEEE.
- Durán, F. E. (2005). Problemas y retos de las actuales políticas urbanas en el contexto de las presentes tendencias hacia formas difusas de ciudad. Pampa: Revista Interuniversitaria de Estudios Territoriales, (1), 87-116.
- Fernandez Battolla, T., Fuentes, S., Illi, J. I., Nacht, J., Falco, M., Pezzuchi, G., & Robiolo, G. (2018). Sistema dinámico y adaptativo para el control del tráfico de una intersección de calles: modelación y simulación de un sistema multi-agente. Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa, 47.
- Fernández, R., & Dextre Quijandría, J. C. (2011). Elementos de la teoría del tráfico vehicular. Pontificia Universidad Católica del Perú. Fondo Editorial.
- Ferrando Ábalos, Á. M. (2017). Coordinación inteligente en vehículos autónomos.
- Fonseca, C. I. Diseño Vial Inteligente Utilizando Técnicas de Inteligencia Artificial.
- Franco, C., Mendez, G., & Espitia, J. (2015). Evaluación de escenarios de descongestión vehicular en Bogotá mediante Dinámica de Sistemas. Ingeniería, 20(2), 3.
- Ghazal, B., ElKhatib, K., Chahine, K., & Kherfan, M. (2016, April). Smart traffic light control system. In 2016 third international conference on electrical, electronics, computer engineering and their applications (EECEA) (pp. 140-145). IEEE.
- González, A. R., & Calle, E. A. D. (2015). Contaminación acústica de origen vehicular en la localidad de Chapinero (Bogotá, Colombia). Gestión y Ambiente, 18(1), 17-28.
- Higuera Arias, C. (2016). Control de intersecciones semaforizadas aplicando aprendizaje por refuerzo multiagente (Master's thesis, Uniandes).
- Jimenez, J. F., Bekrar, A., Zambrano-Rey, G., Trentesaux, D., & Leitão, P. (2017). Pollux: a dynamic hybrid control architecture for flexible job shop systems. International Journal of Production Research, 55(15), 4229-4247.
- Klügl, F. (2008, March). A validation methodology for agent-based simulations. In Proceedings of the 2008 ACM symposium on Applied computing (pp. 39-43).
- Kuppusamy, P., Kamarajapandian, P., Sabari, M. S., & Nithya, J. (2018). Design of smart traffic signal system using internet of things and genetic algorithm. In Advances in Big Data and Cloud Computing (pp. 395-403). Springer, Singapore.
- Leticia, A. (2016). Sistemas MultiAgentes: Un Panorama de aplicación de distribución de ayuda en especie para logística humanitaria en situaciones post-desastres naturales. MultiAgent Systems: A Survey application aid distribution in kind for humanitarian logistic in. Daena: International Journal of Good Conscience, 11(1), 156-167.
- Linares, B. R. J. M., & SÁNCHEZ, J. (2013). Control del tráfico vehicular por medio de semaforos inteligentes (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD RAFAEL URDANETA)
- Loarte Caraguay, R. I., & Vásquez, B. R. Q. (2016). Desarrollo y simulación de un sistema multiagente para la comunicación de semáforos para encontrar la ruta óptima mediante grafos (Bachelor's thesis).
- Mancilla, M. C., López Neri, E., & Hermenegildo Dominguez, L. A. (2019). A Cyber-Physical System Modelling Framework for an Intelligent Urban Traffic System. Computación y Sistemas, 23(2), 299-312.
- Mardacany, E. (2014). Smart cities characteristics: Importance of built environment components.
- Marzougui, B., Hassine, K., & Barkaoui, K. (2011, January). Method for verification of a multi agents system. In 2011 Second International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation (pp. 62-65). IEEE.
- McArthur, S. D., Davidson, E. M., Catterson, V. M., Dimeas, A. L., Hatziargyriou, N. D., Ponci, F., & Funabashi, T. (2007). Multi-agent systems for power engineering applications—Part I: Concepts, approaches, and technical challenges. IEEE Transactions on Power systems, 22(4), 1743-1752.
- Miles, J. C., & Walker, A. J. (2006, September). The potential application of artificial intelligence in transport. In IEE Proceedings-Intelligent Transport Systems (Vol. 153, No. 3, pp. 183-198). IET Digital Library.
- Moreno, L., & Gutiérrez, A. (2012). Ciudades Inteligentes: Oportunidades para generar soluciones sostenibles. Bogotá: CINTEL.
- Nacht, J., Falco, M., & Robiolo, G. (2018). Modelado y Simulación de una Intersección de Calles en un Contexto Multi-Agente. Elektron: ciencia y tecnología en la electrónica de hoy, 2(2), 83-94.

- Nagatani, T. (2007). Vehicular traffic through a sequence of green-wave lights. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 380, 503-511.
- Naik, T., Roopalakshmi, R., Ravi, N. D., Jain, P., & Sowmya, B. H. (2018, April). RFID-Based Smart Traffic Control Framework for Emergency Vehicles. In *2018 Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT)* (pp. 398-401). IEEE.
- Ning, S., & Yan, M. (2010, July). Discussion on research and development of artificial intelligence. In *2010 IEEE International Conference on Advanced Management Science (ICAMS 2010)* (Vol. 1, pp. 110-112). IEEE.
- ONU. (2019). Creciendo a un ritmo menor, se espera que la población mundial alcanzará 9.700 millones en 2050 y un máximo de casi 11.000 millones alrededor de 2100: Informe de la ONU. Recuperado de [https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019\\_PressRelease\\_ES.pdf](https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_PressRelease_ES.pdf)
- Oxford University. (Ed. 4). (2006). *Oxford Dictionary of Current English*. New York: Oxford University Press.
- Pérez Mera, C. J., & Ramos Beltrán, H. J. Aproximación al Comportamiento vehicular en la Intersección Av. NQS con Calle 8 Sur en la Ciudad de Bogotá.
- Posadas Yagüe, J. L., & Poza Luján, J. L. (2009). Revisión de las arquitecturas de control distribuido.
- Reed, T. (2019). INRIX Global Traffic Scorecard.
- Rhodes, C., & Djahel, S. (2017, September). Trader: traffic light phases aware driving for reduced traffic congestion in smart cities. In *2017 International Smart Cities Conference (ISC2)* (pp. 1-8). IEEE.
- Roa, P. A., Morales, C., & Gutiérrez, P. (2015). Norma iso/iec 25000. *Tecnología Investigación y Academia*, 3(2), 27-33.
- Samaniego-Calle, V., Viñán-Ludeña, M. S., Jaramillo-Sangurima, W., Jácome-Galarza, L., & Sinche-Freire, J. (2019). 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.
- Sánchez Arpi, P. P. (2017). Análisis de congestión vehicular para la optimización de los semáforos desde el redondel el cambio hasta el distribuidor el bananero (Bachelor's thesis, Machala).
- Salcedo, O., Pedraza, L. F., & Hernández, C. A. (2006). Modelo de semaforización inteligente para la Ciudad de Bogotá. *Ingeniería*, 11(2), 61-69.
- Seguido, V. (2015). Smart City! Las ciudades del presente [Imagen]. Recuperado de <https://www.eoi.es/blogs/redinnovacionEOI/2015/10/03/smart-city-las-ciudades-del-presente/>
- Segura-Contreras, J. F., & Franco, J. F. (2016). Exposición de peatones a la contaminación del aire en vías con alto tráfico vehicular. *Revista de Salud Pública*, 18, 179-187.
- Smith, S. F., Barlow, G. J., Xie, X. F., & Rubinstein, Z. B. (2013, June). Smart urban signal networks: Initial application of the surtrac adaptive traffic signal control system. In *Twenty-third international conference on automated planning and scheduling*.
- Sörensen, K., & Glover, F. (2013). Metaheuristics. *Encyclopedia of operations research and management science*, 62, 960-970.
- Washburn, D., Sindhu, U., Balaouras, S., Dines, R. A., Hayes, N., & Nelson, L. E. (2009). Helping CIOs understand “smart city” initiatives. *Growth*, 17(2), 1-17.
- Williams, B. (2008). *Intelligent transport systems standards*. Artech House.