

ARTÍCULO ORIGINAL

# Herramienta de simulación para evaluar configuraciones semafóricas

*Simulation Tool to Evaluate Semaphore Settings*

*Ariadna Claudia Moreno Román*

*amoreno@ceis.cujae.edu.cu* • <http://orcid.org/0000-0002-4705-9929>

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA HABANA "JOSÉ ANTONIO ECHEVERRÍA", CUJAE, CUBA

*Dayan Bravo Fraga*

*dayan.bravo@gmail.com* • <http://orcid.org/0000-0002-2579-3735>

EMPRESA DE TELECOMUNICACIONES DE CUBA, ETECSA, CUBA

*Mailyn Moreno Espino*

*my@ceis.cujae.edu.cu* • <http://orcid.org/0000-0002-7613-3382>

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA HABANA "JOSÉ ANTONIO ECHEVERRÍA", CUJAE, CUBA

Recibido: 2020-11-03 • Aceptado: 2021-01-20

## RESUMEN

La mala planificación del tránsito puede traer consigo innumerables efectos negativos como los colapsos, embotellamientos y accidentes. Para evitar esta situación es útil, antes de aplicar configuraciones en el tránsito, conocer el impacto que traerán consigo, para valorar, con más confianza, si la configuración será funcional o no. En la actualidad, la simulación de procesos es una solución adecuada para hacer estos estudios. Según el tipo de simulación empleado, los resultados serán más o menos cercanos a la realidad. La simulación basada en agentes, por sus características, aporta ventajas en cuanto a simulaciones de redes viales. El presente trabajo describe el proceso de desarrollo de una herramienta de simulación basada en agentes que contribuye al proceso de configuración de controladores del tránsito. El desarrollo de esta solución está fundamentado en un estudio comparativo de tecnologías y experiencias previas con el fin de lograr un resultado ajustado a las necesidades y capacidades reales. La herramienta creada utiliza mapas reales de carreteras y simulación basada en agentes utilizando el marco de trabajo MASON para el análisis de configuraciones semafóricas. Con el desarrollo de la misma, analistas e ingenieros de tránsito cuentan con una herramienta que les aporta información

que ayuda al análisis y toma de decisiones en cuanto a los problemas relacionados con la configuración de controladores del tránsito.

**PALABRAS CLAVE:** Agentes inteligentes; Embotellamiento; Mapas de carreteras; Semáforo; Simulación basada en agentes.

## ABSTRACT

*The bad planning of the traffic can bring with it countless negative effects as the collapses, jams and accidents. To avoid this situation, it is useful, before applying configurations in the traffic, to know the impact that they will bring, to value with more trust, if the configuration will be functional or not. Nowadays, the simulation of processes is an appropriate solution to make these studies. According to the used simulation type, the results will be more or less near to the reality. The agent based simulation, for its characteristics, contributes advantages as for simulations of road nets. The present work describes the process of development of an agent based simulation tool that it contributes to the process of traffic controller's configuration. The development of this solution is based in a comparative study of technologies and previous experiences with the purpose of achieving an adjusted result to the necessities and real capacities. The result was the creation of a tool that uses real maps of highways and simulation based on agents using the framework MASON for the analysis of semaphore configurations. With the development of the same one, analysts and traffic engineers have a tool that contributes them information that helps them analyze and make decisions regarding the problems related to the configuration of traffic controllers.*

**KEYWORDS:** Agent Based Simulation; Intelligent Agent; Jam; Maps of highways; Traffic Controller.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la puesta en marcha de un proceso o sistema sin antes tener cierto grado de confianza de cómo será su funcionamiento, no constituye una buena práctica. Esto es provocado por el riesgo de ocurrencia de colapsos, insuficiencias y errores, es decir, obtención de resultados no esperados. Las técnicas de simulación se han utilizado durante mucho tiempo de una forma eficaz para imitar el desempeño de un sistema o artefacto que se desea desarrollar, con el fin de estimar cuál sería su desempeño real (Hillier, 2010). La simulación de un

proceso puede ayudar a identificar y evaluar cuantitativamente soluciones alternativas (Law & WD., 1991).

La Simulación Basada en Multi-Agente (MABS, *Multi-Agent Based Simulation*) se usa actualmente en un número creciente de áreas. Esto se debe, en gran parte, a su capacidad para hacer frente a una amplia variedad de modelos, que van desde entidades simples, generalmente llamadas “agentes reactivos”, a otras más complejas, como los “agentes cognitivos”. Desde hace más de dos décadas, su uso es una tendencia para variedades de dominios científicos como: biología, física, química, ecología, economía, sociología, etc. (Woolridge, 2009).

Una temática en la que la MABS puede aportar ventajas es la Ingeniería del Tránsito. La simulación de redes viales posee una gran importancia ya que, con estas, se puede analizar el comportamiento del tráfico para configuraciones candidatas en los semáforos y otros controladores, obteniendo así datos estadísticos que apoyan la toma de decisiones. De esta forma, se pueden rechazar combinaciones ineficientes, lo que podría estar evitando embotellamientos y colapsos en el momento de la práctica. También estaría sugiriendo los tratamientos con mejor resultado para su posterior aplicación. Esto supone una ventaja considerable, ya que, el fracaso de un proyecto de semaforización supone una pérdida económica considerable en concepto de estructuración del entorno, compra de materiales, mano de obra, etc.

En octubre de 2015, se instanció esta situación en la Rotonda de la Ciudad Deportiva, La Habana, Cuba. El proyecto consistió en instalar un semáforo en cada uno de los accesos a la rotonda, regulando así la entrada a la misma (Dirección Nacional de Tránsito, 2015). El impacto que tuvo esta reforma fue, una congestión en las vías adyacentes por más de 25 minutos, automóviles varados encima del paso a nivel ferroviario e interrupción en la entrada del Hospital Clínico Quirúrgico de 26. Por tal razón, la Dirección Nacional de Tránsito indicó retirar los semáforos en menos de 72 horas de su puesta en funcionamiento (Reinaldo, 2015).

En el mundo se han desarrollado otras herramientas que son utilizadas para resolver también el problema de la configuración de semáforos. En las últimas décadas, muchas agencias e investigadores planificadores del transporte han intentado mejorar los sistemas de señales desplegados. Una visión más matemática del asunto se documenta en Hernández (2009), donde se diseñó e implementó un simulador de flujo vehicular que incorpora un método para realizar la sincronización de un circuito de calles. El método de sincronización desarrollado en este trabajo se realiza por medio de varias teorías como son: teoría de colas, ecuaciones diferenciales parciales, teorías de ondas, las ondas de Shock; todas estas teorías conjuntadas proporcionan el tiempo de duración que debe de tener cada ciclo de los semáforos que conforman el circuito de calles.

El simulador THE (Farooqi, Munir, & Baig, 2011), implementado en Paquistán ofrece una solución al problema del tiempo excesivo de espera de los vehículos en intersecciones señalizadas. Utiliza un algoritmo genético para optimizar el tiempo de luz verde de cada semáforo.

A partir de (Castán, Ibarra, Laria, Guzmán, & Castán, 2014) comienzan a aparecer los agentes. Se presenta el desarrollo de una metodología novedosa que permite incluir un modelo formal basado en agentes autónomos e inteligentes capaces de manipular las fases de los ciclos en una infraestructura de semáforos de acuerdo a las limitaciones de la carretera.

Otro simulador que centra su atención en fenómenos viales es SUMO (Sarkar, Bhaskar, Zheng, & Miska, 2020). SUMO es un paquete de simulación de tráfico de código abierto diseñado para simular cómo se desarrolla una demanda de tráfico dada, que consiste en movimientos de vehículos a través de una red de carreteras predeterminada.

El objetivo de este trabajo es exponer el desarrollo de una herramienta para la configuración semafórica con un marco de trabajo de simulación basada en agentes, extensible y aplicable fácilmente por la Dirección Nacional de Tránsito. El alcance de la herramienta será modelar como agentes las entidades principales del problema a resolver: los semáforos, con su representación más básica de tres luces y los vehículos con posibilidades de colisionar, adelantarse y cometer infracciones.

## METODOLOGÍA

Para realizar la propuesta se hizo un análisis de los agentes inteligentes, la Simulación Basada en Agentes y su potencialidad, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y las facilidades que brindan en el trabajo con mapas y se hizo además un estudio del fenómeno del tráfico en la actualidad.

### LOS AGENTES

Según Woolridge (2009), no existe una definición aceptada de forma universal del término “agente”, y de hecho existe debate y controversia sobre este tema por la variedad de criterios. Una definición tomada de Wooldridge es: “Un agente es un sistema computacional situado en un entorno dado, que es capaz de actuar de forma autónoma para cumplir sus objetivos” (Woolridge, 2009).

### Simulación Basada en Agentes

La Simulación Basada en Agentes (ABS, *Agent Based Simulation*) se refiere a una categoría de modelos computacionales que invoca las acciones dinámicas, las reacciones y los protocolos de intercomunicación entre los agentes en un entorno compartido, para evaluar su diseño y rendimiento y obtener información sobre su comportamiento y propiedades emergentes. Desde el punto de vista de la simulación, la función de un componente individual puede variar desde reglas reactivas muy básicas hasta modelos de comportamiento cognitivos más sofisticados. El objetivo de ABS es modelar sistemas complejos que adoptan un enfoque ascendente a partir de los agentes individuales (Moon, 2017). Un enfoque concreto de ABS es modelar y simular escenarios realistas con un grupo de agentes autogobernados, ya sea como entidades simples dentro de los fragmentos de códigos de cómputo o como objetos considerablemente inteligentes. Esto posiblemente se considere sinónimo de capacidades de resolución de problemas del ser humano con estados infinitos, creencias, confianzas, decisiones, acciones y respuestas. Adquirir el conocimiento adecuado del sistema para construir un modelo conceptual y lógico apropiado es una de las tareas más desafiantes de la simulación (Abar, 2017).

## SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Los Sistemas de Información Geográfica (GIS, *Geographic Information System*) constituyen sistemas integrados y organizados de *hardware*, *software* y datos geográficos, diseñados para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar información geográficamente referenciada y además representar la misma, con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión (Capote & Delgado, 2009).

Los GIS están compuestos por una serie de elementos, donde los datos espaciales son esenciales debido a que contienen la información geográfica necesaria para su funcionamiento. Esta información puede ser almacenada tanto en ficheros como en bases de datos espaciales, utilizándose para dicho fin varias tecnologías, siendo las más comunes, las bases de datos relacionales.

Un ejemplo de almacenamiento en bases de datos puede ser mediante *SQLite* (*SQLite home page*, 2015). Permite el almacenamiento de diferentes geometrías y su consulta a través de un conjunto de métodos almacenados. Igualmente, posee procedimientos para efectuar una gran cantidad de operaciones espaciales, como pueden ser el cálculo de distancia, área, centroide y rutas, por solo citar ejemplos. En la actualidad, existen varias entidades que proveen datos espaciales. Una de estas es *Open Street Map* (OSM) (*OpenStreetMap*, 2018).

## Marco de trabajo MASON

MASON (*Stands for Multi-Agent Simulator Of Neighborhoods... or Networks... or something...*) es una plataforma de simulación basada en agentes, de eventos rápidos y discretos, diseñado para ser la base de grandes simulaciones en el lenguaje de programación, y también para proporcionar funcionalidad más que suficiente para muchas necesidades de simulación de peso ligero. Contiene una biblioteca de modelos y un conjunto opcional de herramientas de visualización en 2D y 3D (Luke, 2017). Como parte de la integración con GIS, MASON cuenta con una extensión opcional llamada *GeoMason* la cual añade soporte para datos geoespaciales y se publica bajo la Licencia Libre Académica (Colleti, 2013).

Las principales características por las que se escoge el marco de trabajo MASON son:

1. Posibilidad de trabajo con GIS,
2. Licencia de Academia Libre,
3. Soporte para usuarios con tutoriales, documentación, listas de correo y ejemplos,
4. Rápido, portátil y computacionalmente poco costoso,
5. Los modelos son independientes y pueden ejecutarse dentro de otras plataformas y aplicaciones (Luke, 2017).

## EL FENÓMENO DEL TRÁNSITO

En la actualidad los medios de transporte son parte fundamental en la vida de los ciudadanos. Con ello, existe un incremento considerable en la cantidad de vehículos que circulan por vías públicas, provocando lamentablemente muchos efectos negativos, tales como embotellamien-

tos, colapsos, contaminación y accidentes. Una de las agravantes principales de esta situación es la mala configuración de controladores del tráfico como el semáforo.

### Los semáforos

Las señales mediante luces se utilizan para regular la circulación vial y generalmente se observan mediante semáforos, divididos los más comunes en tres secciones, verticales u horizontales, situándose sus luces de arriba abajo o de izquierda a derecha respectivamente, siempre manteniendo el siguiente orden: roja, amarilla y verde.

- **Luz roja:** indica que los conductores de vehículos deben detener la marcha en la línea de pare o en la línea de paso para peatones.
- **Luz amarilla:** resulta tanto para conductores como para peatones una señal de aviso, del paso tanto de la luz verde para roja como viceversa; es una luz de aviso o preventiva.
- **Luz verde:** indica a los conductores de vehículos que pueden continuar la marcha por la misma vía que circulan, o girar a la derecha o izquierda según el caso (León, 2016).

La configuración de los semáforos consiste en determinar las fases que conformarán su ciclo, así como el tiempo que tendrá cada una de ellas. También se contempla, como una alternativa de configuración, la ausencia de estos.

### Efecto de la mala configuración de los semáforos

Primeramente, se entiende como “malas configuraciones de los semáforos” a las configuraciones que, lejos de organizar, obstaculizan el flujo del transporte. Al poner en funcionamiento una mala configuración de los semáforos de cierta intersección, dependiendo de la demanda de vehículos que tenga, serán las afectaciones que ocurran.

- **Embotellamientos y colapsos:** los embotellamientos o colapsos del tránsito, son aglomeraciones excesivas de vehículos en espera por la luz del semáforo o por otros vehículos. Estos constituyen una de las principales afectaciones que genera la mala configuración de los semáforos.
- **Contaminación ambiental:** en principio, pudiese parecer absurdo que aplicar malas configuraciones en los controladores del tránsito contribuya a la contaminación ambiental. Pero, una característica típica en los embotellamientos, es que los vehículos avanzan con muy baja velocidad y con frecuentes paradas. Esto implica que los motores funcionen mucho más y, por lo tanto, generen más gases contaminantes que acaban en la atmósfera, contaminan el medio ambiente y fortalecen el cada vez más preocupante, calentamiento global. En Cuba, esta contaminación además se ve incrementada porque aún muchos de los vehículos tienen más de diez años, vehículos que por su antigüedad consumen más energía, producen mayor contaminación y son más ruidosos (contaminación acústica).

Se puede concluir que, en aras de lograr una pequeña contribución al decremento de indicadores, como la contaminación provocada por la generación excesiva de gases de los vehículos, así como los accidentes en vías reguladas por semáforos, es importante conocer qué configuraciones aplicar a los semáforos, y consigo minimizar los embotellamientos.

## FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO EN LA VÍA

El comportamiento de los vehículos en la vía está condicionado por varios factores que se dividen en tres categorías: humanos, del vehículo y externos. Como parte de los factores humanos los conductores en muchas ocasiones realizan maniobras equivocadas para adelantar carril y ello se desenlaza en un lamentable accidente.

Una de las conductas más adoptadas por los conductores es la de adelantar a los vehículos que tienen por delante. Esta conducta puede estar condicionada por los factores anteriormente mencionados, así como por el simple hecho del conductor querer llegar pronto a su destino. El conductor de un vehículo para adelantar a otro, en vías de dos o tres carriles, o sendas en ambos sentidos de circulación, está obligado a (León, 2016): comprobar que puede realizar la maniobra sin interferencia a los demás vehículos que marchen delante, detrás o se acerquen en sentido opuesto al suyo, y sin riesgo de accidente; efectuar el adelantamiento por la senda izquierda; incorporarse de forma gradual y segura a la senda o carril por la que transitaba, siempre que no obligue al conductor del vehículo adelantado a modificar su dirección o velocidad. El conductor del vehículo adelantado está obligado a (León, 2016): no aumentar la velocidad, ni efectuar maniobras que impidan o dificulten el adelantamiento; facilitarle espacio suficiente al vehículo que lo adelanta, para reintegrarse a la senda o carril por la que transita.

## MODELO DE LA SIMULACIÓN

El Modelo del Dominio muestra cómo se relacionan los conceptos y entidades presentes en la propuesta (ver figura 1).

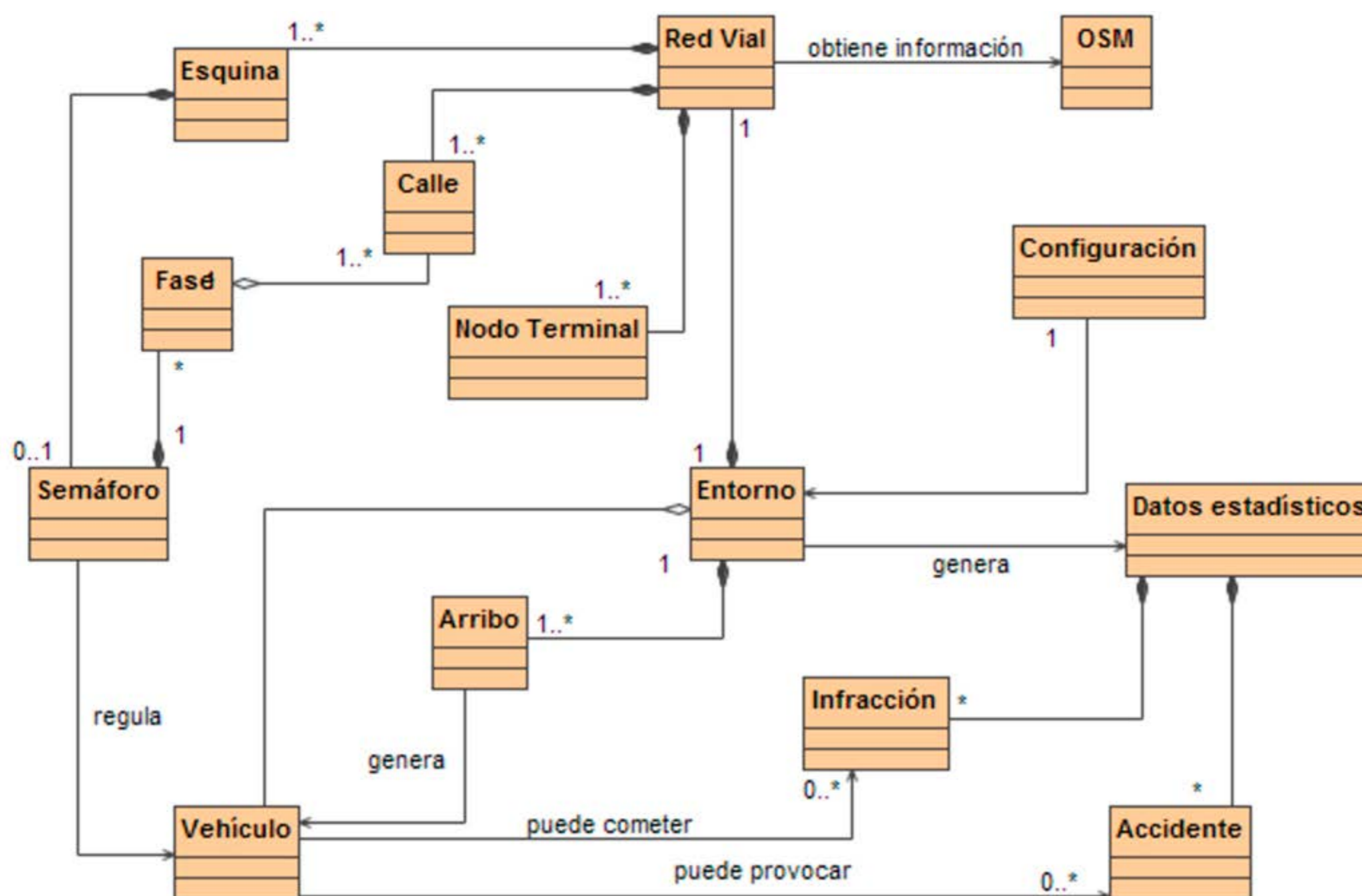


Figura 1: Modelo del Dominio

La simulación se desarrolla en un “Entorno” que es contenedor de una “Red Vial” (construida a partir del GIS utilizado) y un conjunto de vehículos. Los vehículos son regulados por semáforos, pero como entidades inteligentes pueden obedecer o no lo establecido, así como también deciden en qué momento adelantar por el carril en que transitan. Las calles, esquinas, fases de los semáforos, nodos terminales, accidentes e infracciones no constituyen agentes, son clases contenidas en la solución con un comportamiento predeterminado con las que los agentes interactúan durante su marcha.

### Comportamiento de los agentes

- **Agente *Semáforo*:** su comportamiento es simple, comprueba si ya terminó el tiempo establecido de una luz y cambia para la siguiente. Por cada fase del semáforo y dependiendo de la luz que esté activa habrá un grupo de calles permitidas y otras no.
- **Agente *Arribo*:** chequea si ya transcurrió el tiempo entre arribos (TEA) establecido para crear otro agente de tipo vehículo. Si ya transcurrió ese tiempo crea un nuevo vehículo, en caso contrario no realiza ninguna acción y continúa esperando.
- **Agente *Vehículo*:** los vehículos circulan por la red vial siguiendo una ruta trazada en el momento de su creación. Su comportamiento en la vía se basa en probabilidades de choque y eventos aleatorios. De esta manera están modelados los accidentes, los adelantamientos de carril y las infracciones. Las probabilidades de choque son ingresadas a la simulación por el usuario que inicia la herramienta y los eventos aleatorios son creados por el entorno de simulación. La ocurrencia de esos sucesos depende de si el evento aleatorio es menor que la probabilidad de choque de ocurrencia establecida. Los vehículos son generados por un agente tipo arribo y son eliminados cuando llegan a un nodo terminal. Durante su tiempo en la simulación chequean en cada esquina la existencia de semáforos y toman las decisiones pertinentes sobre obedecer o no.

### Parámetros de configuración inicial

Antes de iniciar cada simulación el analista o ingeniero de tránsito que llevará a cabo la misma debe dejar claro los parámetros bajo los cuales funcionarán los agentes y entidades antes descritas. La figura 2 (Parámetros de configuración inicial) es la primera vista de la herramienta donde se especifican los datos con los que trabajarán los agentes durante la simulación. En los casos en que las simulaciones lancen resultados no satisfactorios una solución podría ser iniciarla con parámetros diferentes, tantas veces como lo desee el analista hasta que esté satisfecho con alguna configuración.

The screenshot shows a window titled "Simulación de semáforos" with three tabs: "Simulación", "Datos espaciales", and "Estadísticos". The "Simulación" tab is active, displaying various configuration parameters with input fields and dropdown menus. The parameters are as follows:

Parámetro	Valor	Unidad / Rango
Mapa:	Seleccione el mapa	Menú desplegable
Velocidad promedio:	40	Km/h
Cantidad inicial de vehículos:	0	
Tiempo entre arribo:	1	segundos
Vehículos por arribo:	1	
Cantidad de vehículos a simular:	0	0 = infinito
Tiempo de verde estándar:	10	segundos
Tiempo en amarillo estándar:	3	segundos
Tiempo de rojo estándar:	7	segundos
Probabilidad de colisión:	0.05	(0 - 1)
Probabilidad de colisión para infractores:	0.3	(0 - 1)
Probabilidad de pasar en rojo:	0.05	(0 - 1)
Probabilidad de pasar en amarillo:	0.08	(0 - 1)
Probabilidad de adelantar carril:	0.5	(0 - 1)

At the bottom of the window, there are two buttons: "Cargar MASON" and "Salir".

Figura 2: Parámetros de configuración inicial.



Entre los parámetros a configurar existen dos tipos. Las probabilidades se corresponden con eventos no controlables de la simulación pues son decisiones tomadas por los vehículos como agentes autónomos. El resto de los parámetros son controlables tanto en la simulación como en la puesta en marcha de un proyecto de semaforización real.

### **Resumen estadístico**

Luego de cada simulación la herramienta guarda un conjunto de datos que facilitan el análisis y la toma de decisiones. Entre los datos almacenados se encuentran: cantidad de vehículos simulados, velocidad promedio de los vehículos, tiempo promedio de espera, cantidad de accidentes, cantidad de infracciones y cantidad de infractores. El objetivo de la herramienta es buscar la simulación con el menor número de accidentes, infracciones y el menor tiempo de espera de los vehículos posible.

### **Diseño de Experimentos**

Un diseño de experimentos es un ensayo analítico y prospectivo, caracterizado por la manipulación artificial del factor de estudio por el investigador, un diseño de experimento está compuesto por un conjunto de fases. Es una secuencia de pasos tomados de antemano para asegurar que los datos apropiados se obtendrán de modo que permitan un análisis objetivo que conduzcan a deducciones válidas con respecto al problema planteado (Anderson & Whitcomb, 2000).

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Al aplicar ciertas ejecuciones, siguiendo las directrices de un Diseño de Experimentos (DoE, *Design of Experiments*) se podría estar determinando cuáles de estas configuraciones logran un mejor rendimiento. Para la validación de la herramienta desarrollada se desarrolló un diseño de experimentos orientado al caso “Ciudad Deportiva semaforizada”.

### **FASE DE PLANEACIÓN**

Esta primera fase comienza con el reconocimiento y formulación del problema. Se quiere realizar una simulación en la Ciudad Deportiva, de forma tal que los vehículos circulen por esta área, incluida la rotonda, teniendo que esperar el menor tiempo posible.

El rendimiento es tiempo de espera promedio, en minutos, de los vehículos luego de una simulación de 12 horas. Este tiempo se ve afectado en cada vehículo cuando, está esperando por la luz del semáforo, obstaculizado por un accidente o en cola, es decir, esperando por otro vehículo que a su vez está a la espera. El objetivo es minimizar este tiempo.

Los factores identificados se dividen en dos grupos, controlables y no controlables. El primer grupo comprende los factores siguientes: 1) presencia de semáforos en la rotonda, 2) velocidad promedio de los vehículos y 3) cantidad de vehículos que arriban por segundo (Bajo: un vehículo por cada arribo, Alto: más de tres vehículos por cada arribo). Es válido aclarar que existen otros factores controlables, pero para este diseño de experimentos se tendrán en cuenta solo estos tres, pues se consideran los de mayor influencia en el análisis de la función

objetivo. También fueron identificados otros factores que no pueden ser controlados (segundo grupo), pero no por esto menos importantes, ya que tienen una influencia considerable en el rendimiento. Estos son, cantidad de accidentes, número de infracciones, número de infractores y cantidad de vehículos que llegan a su fin.

### FASE DE DISEÑO

En esta fase se elige la resolución de diseño a aplicar. La cantidad de factores controlables es tres, cada uno con dos niveles definidos, y se debe tener un tratamiento por cada combinación de niveles y factores, esto implica que la cantidad total de tratamientos es ocho.

$$\text{cantidad de tratamientos} = \text{cantidad de niveles}^{\text{cantidad de factores}} = 2^3 = 8$$

Esta cantidad es aceptable (considerablemente pequeña en cuanto a ejecuciones), por lo que se decide aplicar una resolución factorial completo, lo cual implica una ejecución por cada tratamiento. El beneficio más importante que se obtiene con esta resolución de diseño es que se evita la confusión o alias, la cual estaría presente de realizar menos ejecuciones que cantidad de tratamientos total (Anderson & Whitcomb, 2000). Con las ejecuciones de los tratamientos se busca tener una visión del comportamiento de los factores controlables para conocer cuál es la combinación óptima de ellos en la intersección escogida para el experimento.

### Fases de conducción y análisis

Para llevar a cabo la fase de conducción se realizan las 8 ejecuciones con los tratamientos correspondientes cuyos resultados son procesados en la fase de análisis. En la figura 3 *Vista de la ejecución del experimento en la Ciudad Deportiva* se ve una de las ejecuciones.

Con el uso del software estadístico *Minitab* (Minitab, 2019) se obtiene la figura 4 *Gráfica de cubos* que denota a cada vértice del cubo con el resultado del rendimiento. El objetivo del diseño es minimizar el rendimiento, por lo tanto, al buscar el mínimo, se puede apreciar que el menor tiempo de espera promedio de los vehículos es 9 minutos. Entonces, las coordenadas de este vértice indican el tratamiento que logró un mejor rendimiento.

Luego de conocer la simulación de mejor rendimiento, en la tabla 1 *Resultados de las ejecuciones de los tratamientos* se muestra el tiempo de espera promedio para cada ejecución del experimento, junto con los resultados de los factores no controlables definidos para el mismo. La peor simulación entonces será la cuarta, por tener el mayor tiempo de espera (37 minutos). En las ejecuciones de los tratamientos se utilizaron además varias com-

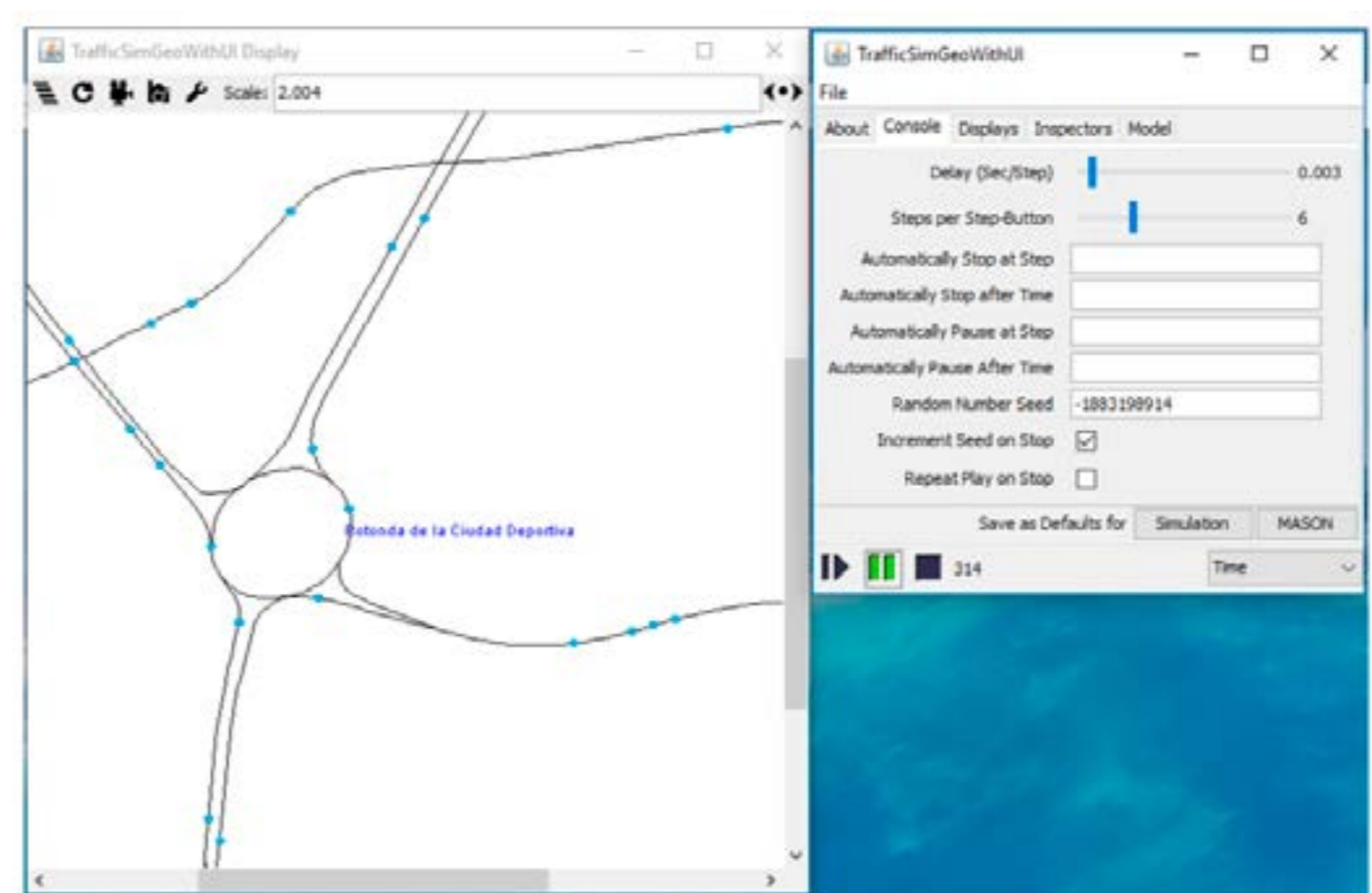


Figura 3: Vista de la ejecución del experimento en la Ciudad Deportiva.

binaciones de parámetros iniciales, para dar cobertura y conocer el comportamiento de la mayor cantidad posible de eventos no controlables dentro de la simulación.

Luego de las fases de planeación, diseño, conducción y análisis correspondientes al diseño de experimento, este lanzó como conclusión la siguiente configuración recomendada: 1) Presencia de semáforos en la rotonda: No. 2) Velocidad promedio de los vehículos: 60 Km/h. 3) Cantidad de vehículos que arriban: 1 u/s.

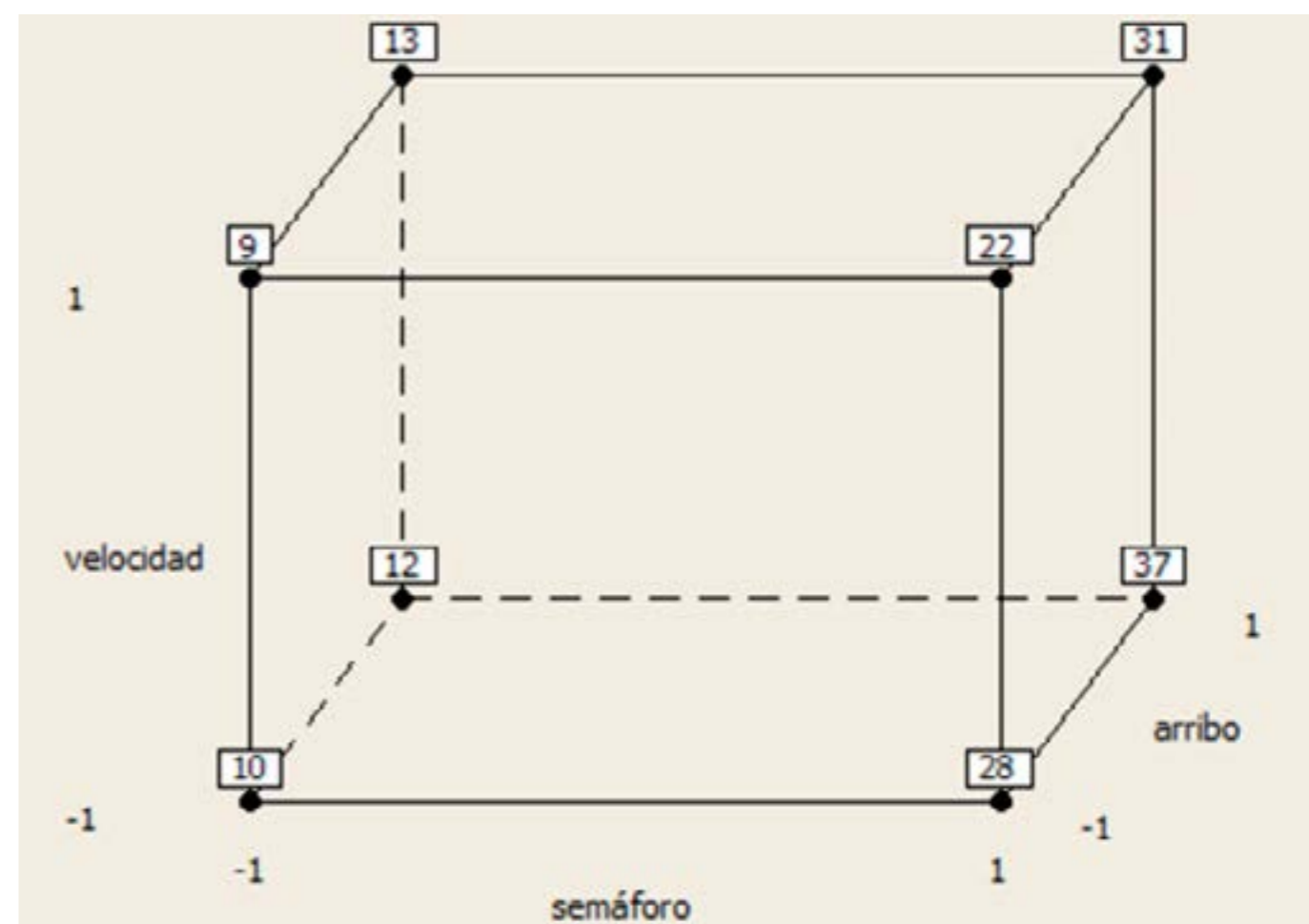


Figura 4: Gráfica de cubos (medias de los datos) para tiempo.

Tabla 1: Resultados de las ejecuciones de los tratamientos.

No.	A: Semáforo	B: Velocidad	C: Arribo	Tiempo	Accidentes	Infracciones	Vehículos que salen
1	Sí	60 Km/h	3u/s	31	1	8	520
2	No	40 Km/h	3u/s	12	0	0	601
3	Sí	40 Km/h	1u/s	28	0	15	631
4	Sí	40 Km/h	3u/s	37	2	3	540
5	No	60 Km/h	1u/s	9	0	0	678
6	Sí	60 Km/h	1u/s	22	0	0	594
7	No	40 Km/h	1u/s	10	1	4	666
8	No	60 Km/h	3u/s	13	0	0	590

## CONCLUSIONES

Se desarrolla una herramienta de simulación que apoya el proceso de configuración de controladores del tránsito en redes viales. Constituye una solución escalable y reutilizable que puede ser fácilmente adaptada y extendida a nuevas funcionalidades gracias al uso de buenas prácticas como patrones de diseño. En futuras versiones se recomienda incluir nuevas señales verticales y horizontales que controlen el tráfico, así como la presencia de peatones transitando por la vía. Además, se recomienda desarrollar un sistema de análisis que sugiera configuraciones de buen rendimiento vial basándose en los datos obtenidos en cada simulación.

También es necesario incluir en la herramienta la distinción de los vehículos según sus características y la presencia de obstáculos en las calles. El clima y la hora del día en que se realiza la simulación es un factor muy influyente en el comportamiento de los vehículos. Por último, las condiciones anímicas bajo las que se encuentren los conductores también serían determinantes en casos de accidentes.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración del Complejo de Tecnología Integrada por su apoyo a esta investigación.

## REFERENCIAS

- Abar, S. (2017). Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software. *Computer Science Review*.
- Anderson, M., & Whitcomb, P. (2000). *Design of experiments*. Wiley Online Library.
- Capote, J., & Delgado, T. (2009). Marco Teórico Infraestructura Datos Espaciales en el Prr CYTED IDEDES. *Semántica espacial y descubrimiento de conocimiento para el desarrollo sostenible*, 21-32.
- Castán, J. A., Ibarra, S., Laria, J., Guzmán, J., & Castán, E. (2014). Control de tráfico basado en agentes inteligentes. *Polibitis*.
- Colleti, M. (2013). *The GeoMason Cookbook*. Department of Computer Science George Mason University.
- Dirección Nacional de Tránsito. (8 de 10 de 2015). *A partir del viernes 9 funcionarán semáforos en la Rotonda de la Ciudad Deportiva*. Recuperado el 30 de 04 de 2019, de Cubadebate: <http://www.cubadebate.cu/noticias/2015/10/08/a-partir-del-viernes-9-funcionaran-semaforos-en-la-rotonda-de-la-ciudad-deportiva/>
- Farooqi, A. H., Munir, A., & Baig, A. R. (2011). The: traffic light simulator and optimization using genetic algorithm. *International Conference on Computer Engineering and Applications*.
- Hernández, E. G. (2009). Desarrollo de un modelo de simulación vehicular para la mejora en la sincronización de semáforos. *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica*.
- Hillier, F. (2010). *Investigación de operaciones*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana de España S.L.
- Law, A., & WD., K. (1991). *Simulation modeling and analysis* (Vol. 2). New York: McGraw-Hill.
- León, A. M. (2016). Código de Seguridad Vial.
- Luke, S. (2017). *Multiagent Simulation And the MASON Library*. Department of Computer Science George Mason University.
- Minitab. (2019). *Minitab Statistical Software*. Retrieved from Minitab: <https://minitab.com>
- Moon, Y. (2017). *Simulation modelling for sustainability: a review of the literature*. *Int J Sustain Eng*.
- Moreno Espino, M. (2013). Patrones para incorporar proactividad en sistemas informáticos (Tesis doctoral). La Habana: Instituto Superior Politécnico, José Antonio Echeverría, CUJAE. Obtenido de <http://tesis.cujae.edu.cu:8080/xmlui/handle/123456789/247>
- OpenStreetMap*. (2018). Recuperado el 01 de 09 de 2019, de <https://www.openstreetmap.org/>
- Reinaldo, O. F. (23 de 12 de 2015). *Rotondas, semáforos y comunicación por descongestionar*. Recuperado el 30 de 04 de 2019, de Cubadebate: <http://www.cubadebate.cu/opinion/2015/12/23/rotondas-semaforos-y-comunicacion-por-descongestionar>
- Sarkar, N. C., Bhaskar, A., Zheng, Z., & Miska, M. P. (2020). Microscopic modelling of area-based heterogeneous traffic flow: Area selection and vehicle movement. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*

*SQLite home page.* (2015). Recuperado el 04 de 09 de 2019, de SQLite: <https://www.sqlite.org/index.html>

Woolridge, M. (2009). *An Introduction to MultiAgent Systems* (2 ed.). Department of Computer Science, University of Liverpool: John Wiley & Sons.

Copyright © 2021 Moreno-Román, A. C., Bravo-Fraga, D., Moreno-Espino, M.



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional.