

Análisis de la norma “pico y placa” en la ciudad de Medellín y su efectividad en mitigación de emisión de contaminantes mediante simulación basada en agentes

Analysis of the norm “pico y placa” in the Medellin city and its effectiveness in mitigating emissions of pollutants using agent-based simulation

Yony Fernando Ceballos¹, Carlos Alberto Gómez G.², Pablo Cesar Osorio R.³

¹Ph. D. en Ingeniería, Profesor Asociado, Universidad de Antioquia,

Grupo Ingeniería y sociedad, Medellín-Colombia

²Ingeniero de sistemas, Universidad de Antioquia

³Ingeniero de sistemas, Universidad de Antioquia

Email: yony.cebillos@udea.edu.co

Recibido: 12/10/2018

Aceptado: 3/12/2018

Cite this article as: Y. F. Ceballos, C. A. Gómez G., P. C. Osorio R. “Analysis of the norm “pico y placa” in the Medellin city and its effectiveness in mitigating emissions of pollutants using agent-based simulation”, *Prospectiva*, Vol 17, N° 1, 25-32, 2019.

RESUMEN

La medida de pico y placa en diferentes ciudades en Colombia se implementa para disminuir la cantidad de vehículos en tránsito durante el día o en horas pico y como efecto, una disminución en la emisión de gases. Este trabajo consiste en la realización de un modelo de simulación basada en agentes que permita evaluar la implementación de esta medida en el municipio de Medellín, sus efectos en términos de emisión de gases e impacto a nivel de congestión vehicular. Como información primaria se emplea la proporcionada por la Secretaria de Movilidad de Medellín y entrevista con expertos. Posteriormente, se identifica la necesidad de realizar un control sobre la cantidad de vehículos que transitan, ya que la cantidad de emisiones de CO (monóxido de carbono) muestra una disminución significativa con la implementación de la medida respecto a un sistema sin restricciones de movilidad. Se observa también que el tiempo de viaje en el cruce seleccionado disminuye considerablemente, debido a la menor cantidad de vehículos presentes. Se identifica la necesidad de realizar estudios posteriores que permitan un comportamiento más cercano a la realidad, en términos de una región geográfica mayor y que incluyan un conjunto mayor de contaminantes al momento de evaluar la simulación.

Palabras clave: *Sistemas Multi-agente; Dinámica vehicular; Contaminación del aire; Simulación, Pico y placa.*

ABSTRACT

The rule of “pico y placa” in different cities in Colombia is implemented to reduce the number of vehicles in transit during the day or during peak hours and as an effect, a decrease in gases emission. This work consists of the realization of an agent-based simulation model that allows to evaluate the implementation of this rule in the municipality of Medellín, its effects in terms gases emission and impact at the level of vehicular crowding. The primary information is that provided by the Mobility Secretary of Medellín and interviews with experts. Subsequently, the need to control the number of vehicles that transit is identified, since the amount of CO (carbon monoxide) emissions shows a significant decrease with the implementation of the rule respect to a system without mobility restrictions. It is also observed that the travel time in the selected crossing decreases considerably, due to the lower number of vehicles present. It also identifies to carry out further studies that shows a behaviour closer to reality, in terms of a larger geographical region and that include a larger set of pollutants when evaluating the simulation.

Key words: *Multi-agent systems; Vehicle dynamics; Air pollution; Computer simulation; Pico y placa.*

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de disminuir la contaminación en zonas urbanas ha existido desde que existe migración de población, aparición de industrias y en general por la búsqueda de servicios públicos, educativos y demás, que suelen estar aglomerados en zonas urbanas [1]. La contaminación en estas zonas aparece de forma natural, por fuentes fijas y fuentes móviles, las cuales generan cerca del 80% de esta contaminación [2], [3]. Generalmente las entidades gubernamentales son las encargadas de realizar acciones orientadas a disminuir la contaminación en estas zonas, asegurando una mejor calidad de vida de los habitantes.

Diversas medidas se han realizado en cuanto a la forma en la cual se pueden mitigar estas emisiones contaminantes en las ciudades. Desde la implementación de estrategias limpias bicicletas, hasta la construcción de nueva infraestructura urbana [4], para lograr que los habitantes se puedan desplazar de manera rápida, económica y ambientalmente amigable. En grandes ciudades se han implementado medidas consistentes en disminuir la cantidad de vehículos en circulación en los instantes del día en el cual generalmente circula la mayor cantidad de los mismos [5], [6].

En Colombia existen diversas medidas orientadas a lograr esta disminución de vehículos. Dentro de estas medidas está el pico y placa, el día sin carro, el día sin moto y otras combinaciones de estas situaciones [7], [8]. De ahí, se identifica la necesidad de valorar estas medidas, ya que normalmente se toman sin realizar un análisis riguroso en ámbitos ambientales, sociales y que permitan que las empresas y entidades gubernamentales no disminuyan su eficiencia.

No obstante, estas medidas necesitan de un análisis espacial asociado al efecto por las zonas donde es aplicada la medida, ya que en normas previas se prohibía el tránsito por todas las calles de la zona urbana, y posteriormente se ha restringido a estrictamente zonas de alto flujo vehicular, como son franjas comerciales e intensivas en transporte público. Tal razón obliga a que los modelos que se construyan permitan incluir características geográficas y situaciones particulares del área de estudio y para tal fin la simulación basada en agentes se presenta como la herramienta más usada y de fácil interpretación, a diferencia de técnicas clásicas de optimización [9]–[12].

En este artículo, se presenta un modelo de simulación basado en agentes para el análisis urbano ambiental de la implementación de la medida del “Pico y Placa” en la ciudad de Medellín, la cual consiste en impedir la circulación de un determinado porcentaje de vehículos, de acuerdo con el último dígito de sus placas por uno o varios intervalos de tiempo en uno o varios días de la semana, en las horas de más alto tráfico conocidas como horas pico [5]. La simulación se realizó con el fin de brindar a los tomadores de decisiones, una alternativa para analizar el impacto futuro que pueda tener la implementación de la medida. El estudio de la situación se acotó a un cruce específico de la ciudad de Medellín [13], ca-

racterizado por estar suficientemente documentado con respecto a su comportamiento a nivel de congestión vehicular y por lo cual, se consideró lo representativo para generalizar los resultados de la simulación.

En la sección 2 se presenta una serie de trabajos relacionados a la resolución de problemas de congestión vehicular y contaminación ambiental mediante el uso de agentes, se presenta un enfoque de solución y desarrollo del modelo respectivamente, posteriormente en la sección 3 se expone la implementación y comprobación del modelo, por último, se presentan las conclusiones y trabajos futuros.

2. TEORÍA/METODOLOGÍA

En el trabajo realizado por Jin, Itmi & Abdulrab en 2004 [14], se propone un nuevo modelo híbrido del control inteligente de la información de tráfico basado en sistemas multi-agente que realiza la interfaz básica, planeamiento y servicios de ayuda para la gestión de diferentes tipos de demanda de transporte. Tomando como base un sistema de información DRT (Demand Responsive Transport) público que atiende los requerimientos de personas en situación de discapacidad o con serios problemas de movilidad en un entorno urbano. Los autores realizan un sistema para construir una plataforma inteligente que tenga la capacidad de asignar dinámicamente los pasajeros a los vehículos y optimizar las rutas, además, un sistema multi-agente simplificado de control de la información de tráfico que sea efectivo para reducir la congestión vehicular y la contaminación del aire, teniendo como principal objetivo aumentar la eficiencia de la movilidad y reducir el número de vehículos en circulación. Finalmente, concluyen que este modelo híbrido es el mejor modelo para el sistema de información inteligente para el control del tráfico urbano.

Mc Breen, Jensen, & Marchal [11], realizan un modelo de congestión basado en agentes, empleando el modelo propuesto por Vickrey en 1969 (Teoría de la congestión e inversión en el transporte) el cual consiste en un número N de vehículos que viajan en una vía de capacidad limitada para llegar al mismo destino en un tiempo t^* [15]. El modelo examina la elección del tiempo de salida para esta situación de tal forma que si el número de vehículos por unidad de tiempo excede la capacidad del sistema se generan congestiones, lo cual se traduce en un incremento de los tiempos de viaje y de costos. Junto con lo anterior se agrega un modelado basado en agentes para determinar el costo total de viaje, por medio del costo de la congestión y el costo de llegada en el tiempo deseado. Se realizan simulaciones tanto con agentes homogéneos como heterogéneos. El objetivo de la investigación fue encontrar un modelo sólido y convergente de la congestión vehicular que puede extenderse a una red de carreteras más realista, los autores concluyen que el uso de agentes heterogéneos proporciona más realismo y estabilidad al modelo.

El trabajo propuesto por Dominguez, Fernández, Aguirre, Garrido, & Brena en el 2005 [16], estudia la contaminación ambiental generada por los vehículos cuando se detienen en

las intersecciones, debido a la relación proporcional que existe entre el tiempo de espera de los vehículos y los niveles de emisión de gases en esa área. Los autores modelan un sistema de tráfico vehicular como un sistema multi-agente y modifican la duración en verde de los semáforos para disminuir los tiempos en los cuales los vehículos se deben detener en las intersecciones. Como resultado de la simulación obtienen un considerable decremento (los niveles de contaminación ambiental disminuyeron entre un 5,12% y un 20,95% para diferentes parámetros de la simulación) de las emisiones de CO de los vehículos en un entorno con políticas de negociación de luces verdes frente a un entorno con luces verdes constantes. Como trabajo futuro los autores proponen experimentar con otras políticas de asignación para negociar los tiempos de espera de los vehículos, con diferentes valores para la difusión y factores de evaporación de CO, así como incorporar la emisión de otros gases para observar el comportamiento de los diferentes porcentajes de reducción.

En 2006 Tumer & Agogino [17] pretenden demostrar que la problemática de la congestión del tráfico puede ser abordada utilizando algoritmos de aprendizaje mediante la aplicación de un enfoque multi-agente presentando un método para mejorar la congestión en dos problemas de tráfico. En primer lugar, presentan una técnica por la cual los agentes pueden coordinar los horarios de salida de los conductores con el fin de aliviar el tráfico en horas pico, el objetivo es maximizar la satisfacción del sistema total haciendo que los agentes aprendan a deducir los mejores tiempos de salida de los conductores de acuerdo con un análisis del día a día logrando así que los siguientes horarios de salida alivien la congestión. En segundo lugar, se plantea una forma en que los agentes aprenden a seleccionar rutas deseables para mejorar el flujo de tráfico y minimizar los retrasos para todos los conductores mediante una estructura de recompensas que penalizan la intensidad de usar ociosamente las rutas de alto tráfico. Frente al problema de coordinar los horarios de salida de los conductores, los resultados en este ámbito muestran que el total de los retrasos del tráfico se puede mejorar significativamente. Igualmente, en el problema de la selección de ruta los resultados muestran que la congestión del tráfico se puede reducir en más del 30%.

Finalmente, en el trabajo realizado por Khalesian, Pahlavani, & Delavar [18], se propone un módulo de software de apoyo para la toma de decisiones de gestión y control de la dinámica de tránsito en virtud de la identificación y elaboración de modelos para determinar la contaminación del aire, especialmente de CO, generados por la congestión del tráfico pesado en arterias urbanas importantes. Este módulo que debe integrarse a un sistema de información geográfica, y pretende predecir la congestión urbana localizada en las principales arterias de Teherán y sus impactos en la cantidad de contaminación atmosférica generada basándose en modelos de micro simulación multi-agente de tráfico que se centran en identificar la ubicación de la congestión, así como su medición.

A partir de los estudios presentados, se concluye que el empleo de la simulación como herramienta y en específico, la simulación basada en agentes ha permitido resolver el problema de la congestión vehicular, ya que la construcción de micro mundos facilita la experimentación de diversas políticas, en las cuales se pueden evaluar alternativas, sin afectar directamente la realidad. Además, la posibilidad de agregar el tiempo como variable permite analizar la sostenibilidad de las políticas evaluadas en el modelo

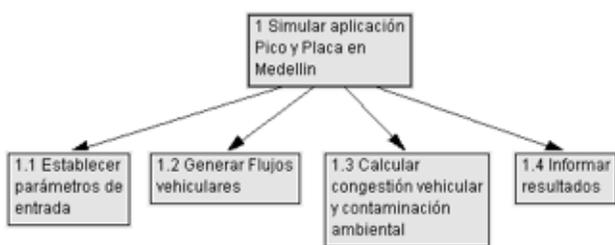
La solución propuesta consistió en implementar un modelo de simulación multi-agente que permita analizar la tendencia marcada por las diferentes variables involucradas en los problemas de congestión vehicular y contaminación ambiental, con el fin de predecir el impacto real derivado de la implementación de la medida del “Pico y Placa” en la ciudad de Medellín sobre los aspectos básicos de su desarrollo urbano y ambiental; en el proceso de modelado se empleó metodología MaSE [19] (Multiagent System Engineering) con el propósito de garantizar la aplicación adecuada de las prácticas de ingeniería de software orientada a agentes, y su implementación se realizó en NetLogo [20], [21]. Además, la simulación está circunscrita a un cruce representativo de la congestión vehicular de la ciudad de Medellín, la Calle 10 con la Carrera 43A (Avenida El Poblado), al sur de la ciudad (figura 1).

Figura 1. Cruce de Calle 10 con Avenida El Poblado; (Tomada de Google Maps).
Figure 1. Crossing of 10th Street with El Poblado Avenue (taken from Google Maps).



Esta simulación genera un tráfico vehicular en las vías y sentidos de dicho cruce, el cual está determinado por la información obtenida sobre los flujos vehiculares reales del sector y por la aplicación de la medida de Pico y Placa, además se toman como valores iniciales el flujo vehicular y la velocidad promedio para cada uno de los sentidos de la vía y los factores de emisión de CO (monóxido de carbono) para cada tipo de vehículo. En cuanto a la congestión vehicular y contaminación ambiental, se realizaron mediciones sobre los tiempos de viaje y niveles de CO respectivamente [5], [22], [23].

Figura 2. Diagrama jerárquico de objetivos.
Figure 2. Objectives hierarchical diagram.



2.1. Desarrollo del modelo conceptual

La construcción del modelo de simulación fue orientado por la metodología MaSE [24], la cual se divide en dos fases: análisis y diseño. Las gráficas fueron desarrolladas en AgentTool®, herramienta que soporta la metodología MaSE.

2.2. Fase de análisis

2.2.1. Requisitos del sistema

El sistema permite simular la aplicación de la política de Pico y Placa en la ciudad de Medellín, por lo cual genera flujos vehiculares y obtiene comportamientos de congestión vehicular y contaminación ambiental. Los flujos vehiculares se calculan de acuerdo con la implementación o no del Pico y Placa, los vehículos tienen un tiempo de viaje y emiten CO por cada unidad de tiempo. La congestión se calcula en términos de la duración del tiempo de viaje, para cada vía y sentido de circulación se calcula un tiempo de viaje promedio y finalmente, los niveles de CO indican los índices de contaminación ambiental y cada tipo de vehículo tiene un factor de emisión de CO y contamina de manera constante.

2.2.2. Captura de objetivos

Para cumplir con los requisitos del sistema se cumplen los siguientes objetivos: establecer parámetros de entrada, generar flujos vehiculares, calcular congestión vehicular y contaminación ambiental e informar resultados. Para establecer parámetros de entrada, y demás necesarios para realizar las operaciones especificadas en los requisitos del sistema, aparecen los siguientes objetivos: definir flujos vehiculares, definir velocidades promedio, definir factores de emisión de CO, definir ciclos de semáforos y establecer opciones de Pico y Placa.

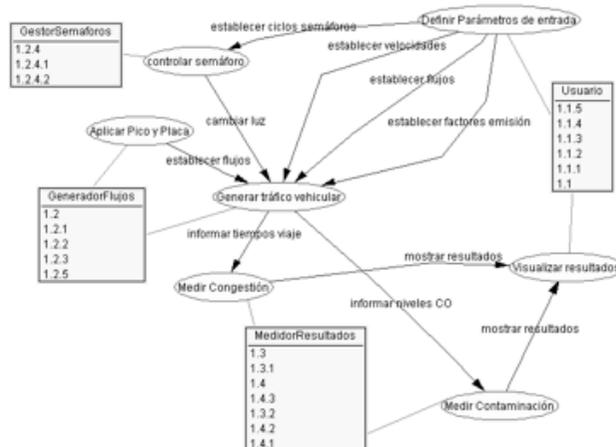
Para generar flujos vehiculares, se deben realizar los siguientes subobjetivos: calcular flujos, generar vehículos, mover vehículos, controlar semáforos, eliminar vehículos, iniciar semáforos y cambiar luz. Para calcular congestión vehicular y contaminación ambiental, son: medir tiempos de viaje y medir niveles de CO y finalmente, para informar resultados se debe: mostrar tiempos de viaje, mostrar niveles de CO y realizar gráficas informativas.

2.2.3. Diagrama de roles

Cada uno de los objetivos descritos es desarrollado por un

rol por medio de diferentes tareas como se observa en la figura 3, los cuales serán convertidos en agentes y funciones. GeneradorFlujos: realiza las tareas de generar tráfico vehicular y aplicar el Pico y Placa; GestorSemáforo: realiza la tarea de controlar los semáforos; Usuario: realiza las tareas de definir los parámetros de entrada y visualizar los resultados y MedidorResultados: realiza las tareas de medir congestión y medir contaminación.

Figura 3. Diagrama de roles.
Figure 3. Role diagram.



2.3.1. Creación de las clases de agentes

Los roles del modelo se dividieron en siete agentes: 1. Vehículo: realiza las operaciones de circular, emitir CO y contar su tiempo de viaje. 2. Semáforo: las funciones de este agente son hacer cambios entre verde amarillo y rojo, además de detener los agentes de tipo vehículo. 3. GestorSemáforos: este agente es usado para calcular los ciclos semafóricos de la intersección y ordenar a los agentes semáforo cuando cambiar de luz. 4. GeneradorVehículos: las funciones de este agente son calcular los flujos vehiculares, decidir qué tipo de vehículo se va a generar y crear los vehículos. 5. ContadorTiempoViaje: sirve para eliminar los vehículos cuando llegan al final de la simulación y capturar su tiempo de viaje. 6. MedidorCO: mide constantemente el nivel de CO emitido por cada tipo de vehículo. 7. InterfazUsuario: este agente sirve de interfaz al usuario del sistema para permitirle definir el número de pasos de la simulación, establecer el valor inicial de los parámetros de entrada, inicializar el mapa de la simulación, iniciar y detener la simulación y visualizar los resultados.

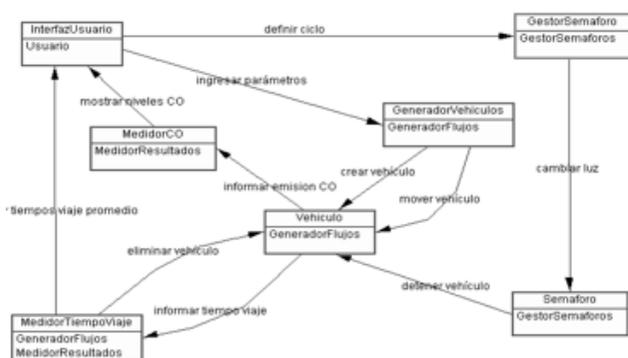
2.3.2. Diagrama de agentes

La figura 4 muestra las clases de agente identificadas y sus respectivos roles. En la tabla 1 se presentan las conversaciones entre ellas. En este diagrama se especifican las interacciones entre los elementos de software empleados en la simulación. Para que el modelo simulado tenga la dinámica correcta es necesario que esta interacción se realice de manera asíncrona, permitiendo múltiples interacciones simultáneas.

Tabla 1. Conversaciones.
Table 1. Conversations.

Conversación	Agente		Descripción
	Emisor	Receptor	
Ingresar parámetros	Interfaz Usuario	Generador Vehículos	Por medio de la interfaz, el usuario del sistema define los parámetros de entrada para el generador de vehículos (flujos, velocidades, factores de emisión de CO y opciones de Pico y Placa)
Definir ciclo	InterfazUsuario	Gestor Semáforo	El usuario por medio de la interfaz ingresa el tiempo de verde de los semáforos de la intersección y el agente GestorSemáforo calcula los ciclos de esta.
Cambiar luz	Gestor Semáforo	Semáforo	El agente GestorSemáforo ordena a los agentes de tipo Semáforo cambiar de luz dependiendo de los ciclos de la intersección y de cual sentido de circulación tiene el paso.
Detener vehículo	Semáforo	Vehículo	Cuando un agente Semáforo se encuentra en estado de detención (luz roja), los vehículos que circulan en ese sentido deben detenerse al llegar a la intersección.
Crear vehículo	Generador Vehículos	Vehículo	Basado en el flujo vehicular de una vía, el GeneradorVehículos crea agentes Vehículo cada cierto tiempo. La probabilidad de crear cada tipo de vehículo (camión, bus, moto, taxi o auto) también depende de las características de cada vía.
Mover vehículo	Generador Vehículos	Vehículo	El agente GeneradorVehículos asigna una velocidad a los agentes Vehículo cuando son creados, estos se mueven de acuerdo con su valor de velocidad.
Informar tiempo viaje	Vehículo	Medidor Tiempo Viaje	Los agentes de tipo Vehículo cuentan su tiempo de viaje constantemente, al momento de finalizar su viaje informan su tiempo total al agente MedidorTiempoViaje.
Informar emisión CO	Vehículo	Medidor CO	Los agentes de tipo Vehículo emiten CO constantemente, el agente MedidorCO monitorea esta emisión e identifica el tipo de vehículo para sumar al medidor correspondiente.
Eliminar Vehículo	Medidor Tiempo Viaje	Vehículo	El agente MedidorTiempoViaje se encarga de eliminar los vehículos cuando estos llegan al final de su viaje y capturar su tiempo de viaje.
Mostrar tiempos viaje promedio	MedidorTiempoViaje	Interfaz Usuario	El agente MedidorTiempoViaje muestra constantemente en la interfaz gráfica, el tiempo de viaje promedio de cada vía y sentido de circulación.
Mostrar niveles CO	MedidorCO	Interfaz Usuario	El agente MedidorCO muestra constantemente en la interfaz gráfica, los niveles de CO de cada tipo de vehículo y el nivel total de CO.

Figura 4. Diagrama de clases.
Figure 4. Class diagram.



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la implementación se emplea el software Netlogo, el cual es ampliamente empleado en estudios de simulación basada en agentes [20], [25], [26].

3.1. Límites

Para simular un tráfico vehicular en las vías y sentidos del cruce mencionado se tienen como parámetros de entrada: las velocidades, flujos (cantidad de vehículos por intervalo de tiempo), factores de emisión de CO de cada tipo de vehículo (camiones, buses, automóviles y motocicletas), el comportamiento de los semáforos, el número de pasos de la simulación y las diferentes opciones de aplicación de la medida (sin Pico y Placa o con cualquiera de las medidas de Pico y Placa). Como parámetros

de salida se obtienen para cada corrida de simulación, los tiempos de viaje de cada vía y sentido como indicativo de la congestión y el nivel total de CO como indicativo de la contaminación emitida. Además, el modelo abordó el problema desde condiciones ideales por lo que no se tienen en cuenta factores como la posibilidad de accidentes de tránsito, la interacción de los vehículos con el peatón o imprudencia de este frente al uso de la vía, los incidentes de fallo de los vehículos, la detención de vehículos de transporte público para dejar o recoger pasajeros, el uso de la vía por parte de automotores no convencionales como tractores, montacargas, maquinaria pesada, tracción animal, etc., el control adicional que eventualmente puedan ejercer sobre dichas vías las autoridades de tránsito a través de sus guardas y demás situaciones que puedan ser consideradas como excepcionales en una vía de carácter urbano.

3.2. Supuestos

La simulación está sujeta a los siguientes supuestos:

- Giro de los vehículos: solo giran los vehículos que se desplazan por el carril adyacente al eje de giro. Los vehículos que se desplazan por los carriles intermedios en ningún momento giran.
- Vehículos exentos de la medida: no se consideraron excepciones de ninguna índole a la aplicación de la medida a la hora de calcular los flujos de vehículos circulantes (vehículos a gas, placas diplomáticas, vehículos oficiales, de escoltas, ambulancias etc.).
- Motos de dos tiempos: se asignó un porcentaje arbitrario del 10% del total del número motos en circulación.

- Ciclo de semáforo: en el sistema real la intersección solo tiene un ciclo de semáforo, el cual controla los 3 semáforos que hay en esta. Un semáforo controla el tránsito de la Calle 10, mientras otro conjunto de semáforos controla el tránsito de la Avenida el Poblado en ambos sentidos. Para la simulación se consideró un tiempo de verde igual para ambos conjuntos de semáforos, por lo cual, los tiempos de verde, amarillo y rojo son iguales para todos los semáforos.

- Detención en los semáforos: los vehículos se detienen cuando el semáforo cambia a amarillo con el fin de evitar colisiones en la intersección, además, en ningún momento los vehículos se pasan los semáforos en rojo.

- Circulación de las motocicletas: las motocicletas ocupan un carril y se comportan como los demás vehículos.

- Adelanto de vehículos: no se considera el adelantamiento entre vehículos, cuando un vehículo tiene otro en frente circulando a una velocidad inferior, se somete a ésta.

3.3. Simulación

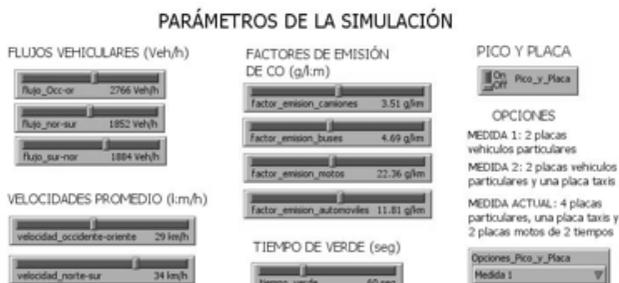
Se estableció un horizonte de tiempo de la simulación de 2 horas y un paso por cada segundo, por lo cual, se tiene que el tiempo inicial es de 0 segundos, el tiempo final de 7200 segundos (2 horas) y el tamaño de paso es de 1 segundo. Inicialmente se construyó el mapa de la simulación con las vías que componen el cruce, luego se diseñó el cuadro de controles que permite la inicialización, arranque y detención de la simulación, la configuración del número de pasos a simular y cuadros de información del tiempo simulado y el estado de la simulación (figura 5).

Figura 5. Controles de la simulación.
Figure 5. Simulation controls.



Posteriormente se estableció el cuadro de control que permite ingresar los parámetros de entrada como se observa en la figura 6.

Figura 6. Parámetros de entrada.
Figure 6. Input parameters.



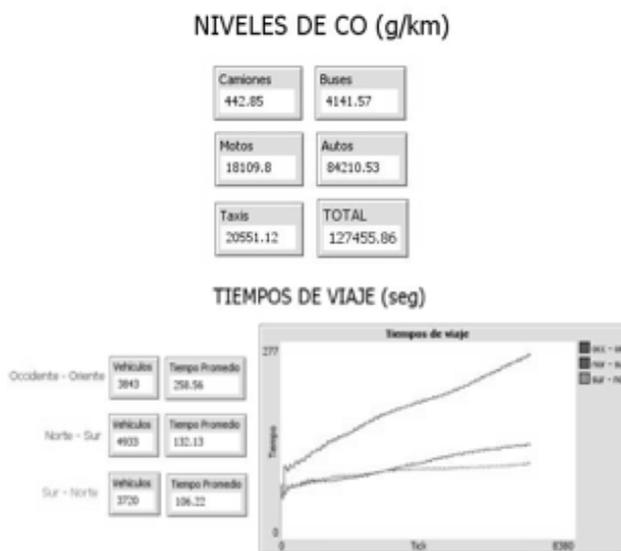
Se generaron los flujos vehiculares dotando los agentes involucrados con sus respectivos comportamientos, como resultado la simulación presenta un tráfico vehicular como se muestra en la figura 7. Los datos de emisiones, flujo y tráfico se tomaron de los artículos [5], [13], [27].

Figura 7. Tráfico simulado.
Figure 7. Simulated traffic.



Finalmente, se ubicaron las etiquetas y gráficos que permiten visualizar los parámetros de salida para los tiempos de viaje y niveles de CO como se observa en la figura 8. Finalmente, se generaron los flujos vehiculares dotando los agentes involucrados con sus respectivos comportamientos, como resultado la simulación presenta un tráfico vehicular como se muestra en la figura 7.

Figura 8. Parámetros de salida.
Figure 8. output parameters.



Para la asignación de velocidades y factores de emisión de CO se realizaron conversiones teniendo en cuenta las siguientes convenciones: 1 Tick = 1 segundo y 1 Patch = 5 metros y para la variación de los flujos vehiculares con el fin de obtener los resultados correspondientes a la aplicación del Pico y Placa se tienen las siguientes opciones: sin Pico y Placa, Medida 1, Medida 2 y Medida actual.

3.4. Comprobación del modelo

3.4.1. Verificación

Para la verificación del modelo se usaron pruebas de trazado, pruebas de continuidad y pruebas de degeneración.

Prueba de trazado: se realizó en cuatro partes importantes del modelo: la generación del flujo vehicular, la creación de cada tipo de vehículo, la asignación de velocidades y la asignación de factores de emisión de CO a los vehículos, y se observó el comportamiento de las variables involucradas en cada una de estas partes, con el fin de verificar el comportamiento de algunas variables en puntos claves del modelo, donde se generan números aleatorios y se asignan atributos a los agentes.

Prueba de continuidad: se tomaron cuatro grupos de variables de entrada: factores de emisión de CO, flujos vehiculares, velocidades y tiempo de verde, a cada parámetro de entrada se le efectuaron ligeras variaciones del 1%, 2%, 5% y 10% por encima y por debajo de los valores por defecto, con el propósito de detectar la existencia de cambios bruscos en los parámetros de salida. Para la Prueba de degeneración: se tomaron los parámetros de entrada de forma individual y se corrió la simulación ubicando cada uno en sus valores extremos inferior y superior, con el fin de detectar comportamientos anómalos en el proceso de simulación y valores incorrectos en los parámetros de salida.

Después de aplicar las pruebas descritas y con base en sus resultados, se concluyó que el modelo está cumpliendo supuestos, ya que cuando se realizan cambios en los parámetros de entrada las salidas cambian de acuerdo con lo esperado.

3.4.2. Validación y resultados

Para asegurarse de que el modelo es representativo del sistema real, se validó usando la técnica de comparación con mediciones en el sistema real. En cuanto a la comparación con el sistema real, se efectuaron cambios en los flujos vehiculares de entrada por medio de las opciones disponibles de Pico y Placa (Medida 1, Medida 2 y Medida actual), además del flujo por defecto en las horas pico sin el Pico y Placa. Para opción se realizaron 10 corridas y se observó el comportamiento de los parámetros de salida para la congestión vehicular (tiempos de viaje) y la contaminación ambiental (nivel de CO) posteriormente se obtuvo datos del sistema real sobre los efectos de la aplicación del Pico y Placa en la ciudad de Medellín, con el fin de asegurarse de que los supuestos usados en el desarrollo del modelo son razonables y que este producirá resultados próximos a los observados en el sistema real.

Datos del sistema real: La secretaría de Transportes y Tránsito de Medellín, expuso ante el concejo de la ciudad un informe ejecutivo acerca del impacto y resultados de la aplicación de la medida de Pico y Placa hasta el momento [5], [22], en el cual se citan estudios que afirman que el promedio de disminución de tiempos de viajes y grado de saturación mejoró, para algunos casos específicos se registraron disminuciones entre el 30% y 40%, además la contaminación de monóxido de carbono disminuyó hasta un 30%, lo cual se evidencia en el estudio realizado (ver tabla 2).

Las variaciones que se tienen entre los valores del sistema real y los simulados implican una mayor disminución del número de vehículos que salen de circulación y se ve reflejado en una mayor disminución de los tiempos de viaje y niveles de CO. De acuerdo con la comparación de resultados, se deduce que la simulación es una correcta representación del sistema real, ya que los supuestos son válidos para un escenario ideal del sistema, además los datos utilizados en el modelo son los apropiados porque se ajustan correctamente al objetivo de este y los valores de salida de la simulación producen resultados próximos al sistema real.

CONCLUSIONES

La investigación de los modelos de simulación multi-agente aplicados a problemas de flujo vehicular y contaminación ambiental, permitió establecer que en términos generales es más abordado el problema de la congestión vehicular que el de contaminación y más bien se utilizan los resultados del primer problema para hacer inferencias acerca del segundo. Además, La estrecha relación de la metodología MaSE con el paradigma objetual y el lenguaje de modelado UML, facilitó en gran medida las labores de análisis y diseño del modelo. Así mismo, el uso de AgentTool la herramienta que soporta el modelado con MaSE, permitió un desarrollo más eficaz de la metodología.

Se desarrolló satisfactoriamente un prototipo de simulación que permite evaluar los efectos de la implementación del “Pico y Placa” en Medellín tanto a nivel de congestión vehicular como de contaminación ambiental producida por CO, además, se comprobó que un sistema como el descrito en este trabajo es viable y adaptable a diferentes escenarios de la medida para interactuar de forma fácil y cómoda con los usuarios, además los procesos de verificación y validación del modelo permiten concluir que este tiene un comportamiento conforme a lo esperado y que la simulación es una buena representación del sistema real. Teniendo en cuenta

Tabla 2. Resultados.
Table 2. Results.

OPCIÓN	SALIDAS								
	TIEMPOS DE VIAJE				NIVEL DE CO				
	occ-or	% variación	nor-sur	% variación	sur-nor	% variación	% variación promedio	TOTAL	% variación
Sin Pico y Placa	280,94	0%	125,34	0%	105,74	0%	0%	134846,77	0%
Pico y Placa Medida 1	113,15	-60%	78,37	-37%	79,22	-25%	-41%	58987,03	-56%
Pico y Placa Medida 2	107,29	-62%	79,22	-37%	77,49	-27%	-42%	56672,40	-58%
Pico y Placa Medida Actual	98,735	-65%	74,366	-41%	72,968	-31%	-46%	44727,104	-67%

que el sistema real es grande y complejo, existe un sinnúmero de factores que pueden incidir en la aplicación de una medida como el Pico y Placa dentro del mismo, dichos factores no pueden ser incorporados o adaptados fielmente al desarrollo de la simulación, por lo tanto, de alguna manera el sistema simulado representa una situación ideal del sistema real.

La simulación permite evaluar los escenarios planteados, logrando concluir que (incluso con los supuestos realizados en la modelación), se logra una disminución significativa de la emisión de CO y también del tiempo de viaje. Es necesario extender el modelo a situaciones de espacios entre carriles, vehículos de emergencias e inclusión de vehículos exentos de pico y placa.

Respecto a trabajos futuros, en cuanto a la medición de los factores de emisión de gases vehiculares involucrados directamente en la contaminación ambiental, estos podrían ampliarse a otros componentes importantes como dióxido de sulfuro (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de carbono (CO₂) y material particulado, entre otros.

En cuanto al alcance de medición del modelo, sería recomendable ampliar la simulación a más cruces tanto en forma aislada como de forma colectiva o colaborativa, es decir, una malla vial más extensa que permita inferir resultados con mayor precisión. También es necesario complementar el modelo con otros aspectos que guardan estrecha relación con la congestión vehicular como son la accidentalidad vial, las detenciones de los vehículos de servicio público en sitios y momentos no adecuados, la interacción del peatón con la vía, entre otros. Si bien el NetLogo permitió con relativa rapidez la implementación de un sistema que posibilitó emular satisfactoriamente las características del sistema real, sería aconsejable implementar el modelo en una herramienta de simulación más potente que permita imprimir características más realistas al producto final, además de integrar este prototipo de simulación a las redes y sistemas de los diferentes entes públicos y privados de la ciudad involucrados en la temática expuesta en este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] P. Campuzano, S. Cerquera, “Urbanización y migración entre ciudades, 1995-2000. Un análisis multinivel”, *Papeles de población*, 14(56), 174–214, 2008.
- [2] T. Wangchuk, L. D. Knibbs, C. He, L. Morawska, “Mobile assessment of on-road air pollution and its sources along the East-West Highway in Bhutan”, *Atmospheric Environment*, 118, 98–106, 2015.
- [3] G. Bel, M. Holst, “Evaluation of the Impact of Bus Rapid Transit on Air Pollution”, 63, no. March 2017, 1–39, 2018.
- [4] K. Wark, C. F. Warner, *Air pollution: its origin and control*. Harper and Row Publishers, New York, NY, 1981.
- [5] J. J. Henao, V. F. Castro, C. Alberto, G. Calderón, “Análisis del ‘pico y placa’ como restricción a la circulación vehicular en Medellín - basado en volúmenes vehiculares”, *Dyna*, 165(00127353), 112–121, 2011.
- [6] J. W. Joubert, “Multi-agent model of route choice when vehicles are sensitive to road grade”, *Procedia Computer Science*, 109, 869–874, 2017.
- [7] M. Masiol, C. Agostinelli, G. Formenton, E. Tarabotti, B. Pavoni, “Thirteen years of air pollution hourly monitoring in a large city: Potential sources, trends, cycles and effects of car-free days”, *Science of the Total Environment*, 494–495, 84–96, 2014.
- [8] J. Barthelemy, P. Toint, “A stochastic and flexible activity based model for large population. Application to Belgium”, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 18(3), 2015.
- [9] C. M. Macal, M. J. North, “Tutorial on agent-based modelling and simulation”, *Journal of Simulation*, 4(3), 3, 151–162, 2010.
- [10] C. Nikolai, G. Madey, “Tools of the Trade : A Survey of Various Agent Based Modeling Platforms”, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 12, 2, 2009.
- [11] J. McBreen, P. Jensen, F. Marchal, “An Agent-based Simulation Model of Traffic Congestion”, in *Proceedings of the 4th Workshop on Agents in Traffic and Transportation*, 2006, 43–49.
- [12] C. A. Gil Gonzalez, J. P. Orejuela Cabrera, D. Peña Calderon, “El Problema de patrones de corte, clasificación y enfoques/Cutting stock problem, classification and approaches”, *Prospectiva*, 15(1), 112–126, 2017.
- [13] M. Jiménez, I. Sarmiento, “Sistema adaptativo de control y optimización del tráfico de un corredor vial semaforizado. Aplicación a la ciudad de Medellín”, *DYNA*, 78(169), 71–78, 2011.
- [14] X. Jin, M. Itmi, H. Abdulrab, A cooperative multi-agent system simulation model for urban traffic intelligent control, in San Diego, *Comput. Simul. Int. San Diego, CA*, 2007.
- [15] W. S. Vickrey, “Congestion Theory and Transport Investment”, *American Economic Review*, 59(2), 251–260, 1969.
- [16] J. H. Domínguez, L. M. Fernández, J. L. Aguirre, L. Garrido, R. Brena, “Air pollution assessment through a multiagent-based traffic simulation”, *Lecture Notes in Computer Science*, 3789, 297–306, 2005.
- [17] K. Tumer, A. Agogino, Agent reward shaping for alleviating traffic congestion, *AAMAS-06 Work. Agents Traffic Transp.*, 2006.
- [18] M. Khalesian, P. Pahlavani, M. R. Delavar, “Gis-Based Multi-Agent Traffic Micro Simulation for Modelling the Local Air Pollution”, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVII, 491–496, 2008.
- [19] M. Wood, S. DeLoach, “An overview of the multiagent systems engineering methodology”, *International Workshop on Agent-Oriented Software Engineering*, 1957, 207–221, 2001.
- [20] U. Wilensky, “NetLogo: Center for Connected Learning Comp.-Based Modeling”, *Evanston, IL: Northwestern Univ.*, 1999. .
- [21] A. Banos, C. Lang, N. Marilleau, *Agent-based Spatial Simulation with Netlogo*. 2015.
- [22] M. M. V. Toro, J. J. Ramirez, R. A. R. Quiceno, C. A. Zuluaga, J. Ramirez, “Cálculo de la emisión vehicular de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Medellín mediante factores de emisión corinair”, *ACODAL*, 2, 191, 42–49, 2001.
- [23] H. fu Huang, H. wen Ma, “An agent-based model for an air emissions cap and trade program: A case study in Taiwan”, *Journal of Environmental Management*, 183, 613–621, 2016.
- [24] S. A. Deloach, M. F. W. H. Sparkman, M. S. Engineering, “Multiagent systems engineering”, *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*, 11(3), 231–258, 2001.
- [25] E. Sklar, “NetLogo, a multi-agent simulation environment”, *Artificial Life*, 13(3), 303–11, 2007.
- [26] K. Bajracharya, R. Duboz, “Comparison of three agent-based platforms on the basis of a simple epidemiological model (WIP)”, *Proc. Symp. Theory Model. Simul. - DEVS Integr. M&S Symp.*, p. 6, 2013.
- [27] V. Toro, J. J. Ramirez B, R. A. Quiceno G, C. A. Zuluaga T, “Cálculo de la emisión vehicular de contaminantes atmosféricos en la ciudad de medellín mediante factores de emisión corinair”, *ACODAL*, 191(191), 42–49, 2001.