

Las técnicas de inteligencia artificial aplicadas al control y configuración del tráfico

Artificial intelligence techniques applied to traffic control and configuration

Ariadna Claudia Moreno Román^{1,*}

¹Facultad de Ingeniería Informática. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE). Calle 114 No 11901 entre Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba.

*Correspondencia: amoreno@ceis.cujae.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Resumen

La mala planificación del tránsito puede traer consigo efectos no deseados como los embotellamientos, los colapsos y los accidentes viales. En estos sucesos, además de perderse vidas humanas y recursos materiales, es contaminado el medio ambiente a través del humo de los vehículos; y también de manera sonora por el sonido de los cláxones. Por otra parte, existen factores humanos, de los vehículos y externos que unidos a una mala configuración pueden ser potenciales provocadores de siniestros en la vía. Para evitar situaciones como esta es necesario, antes de decidir colocar señalizaciones viales, saber si las mismas tendrán el resultado esperado o saber qué situaciones provoca. Las técnicas de inteligencia artificial y la simulación basada en agentes inteligentes han sido utilizadas en múltiples ocasiones para apoyar estudios y tomas de decisiones relacionados con este tema. En este trabajo se presenta cómo el uso de las técnicas de simulación, y de inteligencia artificial va en aumento para la resolución de problemas de configuración de señales en redes viales, principalmente la colocación de controladores de tráfico en intersecciones de carreteras, mediante la imitación del comportamiento de todos los usuarios de la vía.

Palabras clave: control de tráfico, inteligencia artificial, señales viales, simulación basada en agentes

Abstract

Poor traffic planning can lead to unwanted effects such as traffic jams, collapses, and road accidents. In these events, in addition to losing human lives and material resources, the environment is polluted through vehicle smoke; and also audibly by the sound of the claxons. On the other hand, there are human, vehicle and external factors that together with a bad configuration can be potential drivers of accidents on the road. To avoid situations like this it is necessary, before deciding to place road signs, to know if they will have the expected result or to know what situations it causes. Artificial intelligence techniques and simulation based on intelligent agents have been used on multiple occasions to support studies and decision-making related to this topic. This paper presents how the use of simulation and artificial intelligence techniques is increasing for solving signal configuration problems in road networks, mainly the placement of traffic controllers at road intersections, by imitating the behavior of all road users.

Keywords: agent-based simulation, artificial intelligence, traffic control, traffic signals

1. Introducción

En la actualidad, la puesta en marcha de un proceso 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 [1].

La Simulación Basada en Multi-Agente (MABS, *Multi-Agent Based Simulation*) se usa actualmente en un número creciente de áreas. Esto se debe, en mayor parte, a su capacidad para hacer frente a una amplia variedad de modelos [2]. Una de las temáticas que puede abordar la MABS es la ingeniería de tránsito, siendo una potente herramienta para la configuración de los controladores. En Cuba actualmente la colocación de semáforos en intersecciones de carreteras se realiza sin tener un previo conocimiento del impacto que tendrá. La instalación de estas señalizaciones supone para el país una inversión de recursos materiales y mano de obra que se desperdician si el resultado es contraproducente. Además, la mala configuración semafórica trae como consecuencia embotellamientos en las vías, accidentes y contaminación, y por supuesto pérdidas económicas [2].

Además de la mala configuración de las señales existen otros factores que influyen en el buen desarrollo del flujo vehicular en la vía. Comportamientos humanos como la desobediencia a las señales, el estado técnico de los vehículos, la presencia de animales y obstáculos obstruyendo las calles, entre otros, son también provocadores potenciales de accidentes [3].

Otras técnicas de inteligencia artificial también son utilizadas para modelar problemas de control y planificación del tráfico. Entre ellas están los modelos basados en lógica difusa, los sistemas de información geográficos para obtener datos reales de carreteras a simular, la utilización de modelos matemáticos para optimizar los valores a simular posteriormente.

El presente trabajo contiene un estudio del fenómeno del tránsito en la actualidad cubana, teniendo en cuenta todos los factores involucrados en su buen desempeño. Luego se exponen los temas relacionados con el uso de la simulación basada en agentes y demás técnicas de inteligencia artificial para la configuración del tráfico, así como la existencia de herramientas desarrolladas con este fin.

2. El fenómeno del tráfico

En el último siglo el transporte se ha convertido en una parte fundamental de la vida ciudadana. Como resultado de ello, se han incrementado de manera considerable el número de usuarios que transitan por las vías en vehículos de cualquier tipo. Con este aumento, se incrementa también lamentablemente, el número de efectos negativos, como son los embotellamientos, colapsos, contaminación y accidentes. Una de las causas que agrava esta situación es la mala configuración de controladores del tráfico y otras señales viales. Además, existen también otras causas que van más allá de esta configuración, y son las relacionadas con factores humanos, ambientales y de los vehículos que transitan por las vías.

Las señales de tráfico o señales de tránsito son los signos usados en la vía pública para impartir la información necesaria a los usuarios que transitan por un camino o carretera, en especial los conductores de vehículos y peatones [4].

Son las siguientes según su prioridad:

- Señales y órdenes de los agentes de circulación.
- Señalización circunstancial que modifique el régimen normal de utilización de la vía y señales de balizamiento fijo.
- Señales mediante luces de los semáforos, sonoras y lumínicas.
- Señales verticales de circulación.
- Señales horizontales.

Si se diera el caso de que se encuentran varias señales contradictorias, prevalecerá la más prioritaria, y en el caso de que sean del mismo grupo, la más restrictiva [4]. Puesto que las diferencias de idioma pueden crear barreras, las muestras internacionales usan símbolos en lugar de palabras. Se han desarrollado principalmente en Europa y se han adoptado en la mayoría de los países, incluyendo a Cuba.

Uno de los elementos más importantes de la vía son los vehículos y los conductores que transitan en ellos. Los comportamientos de este grupo de usuarios determinan muchos de los resultados de las configuraciones de tráfico realizadas.

Los errores humanos son una de las causas más frecuentes en los accidentes de tránsito y muchas veces pueden ser evitables. El exceso de confianza, la distracción, el consumo de drogas y alcohol, el exceso de velocidad, conducir con cansancio o fatiga, usar dispositivos electrónicos, de navegación o de radio, ejecutar maniobras peligrosas o adelantamientos indebidos son algunos motivos provocadores de accidentes que tienen como base al factor humano [3].

Los peatones como usuarios de la vía también cargan en ocasiones con la culpa de los accidentes, ya sea por cruzar intersecciones señalizadas sin obedecer, estar distraídos, hacer carreras delante de los vehículos, entre otras acciones que ponen en peligro su vida. Además, el estado de ánimo también influye sobre este comportamiento.

De manera general, en las personas juega un papel muy importante la experticia que tengan en la vía, ya sea de conductor o de peatón. Conocer las leyes del tránsito y las intersecciones por las que se transita siempre ayuda a desenvolverse mejor.

Las características de cada vehículo tienen mucho que decir sobre las probabilidades que tenga el mismo de colisionar. Un estudio realizado en la Universidad de Monash [5] establece una variación de la peligrosidad de los vehículos según su color y el momento del día, teniendo como partida la peligrosidad de los vehículos de color blanco.

La Tabla 1 presenta la relación entre los accidentes de tránsito y los distintos colores de automóviles definidos para Australia. Como unidad se utiliza la peligrosidad del color blanco. Por ejemplo, durante el día, el color plata (1,10) es 10% más peligroso que el color blanco, al atardecer o al amanecer (1,15) es 15% más peligroso y de noche (1,08) es 8% más peligroso.

Tabla 1. Posibilidad de accidentes según el color y el momento del día

Posibilidad de accidentes en distintos momentos del día (blanco: 1.00)			
Color del vehículo	De día	Atardecer	De noche
Blanco	1.01	1.00	1.05
Anaranjado	0.0999	1.21	0.77
Beige	0.93	1.16	0.97
Amarillo	1.00	0.88	1.00
Rosado	1.19	0.66	1.06
Rojo	1.07	1.02	1.10
Azul	1.07	0.82	1.09
Morado	1.11	1.01	1.1
Verde	1.04	1.03	1.04
Café	1.05	1.12	0.98
Gris	1.1	1.25	1.07
Negro	1.12	1.47	0.98

Además del color, el peso del vehículo, su tipo de carrocería y el uso que se le da también son factores determinantes en su comportamiento en la vía, y es diferente el impacto que tienen en un accidente. La Tabla 2 contiene las velocidades máximas establecidas en Cuba (en kilómetros por hora) para cada tipo de vehículo en las diferentes vías.

Tabla 2. Velocidades máximas según tipo de vehículo

Vehículo	Carretera	Autopista
Motor	50	
Automóviles de hasta 3500 kg y Ómnibus	90	100
Transporte de carga rígido y articulados	80	90
Remolques, grúas y similares	70	80
Construcción, industriales, tractores y equipos agrícolas	20	

Queda claro que un accidente donde esté involucrado un remolque será mucho más peligroso que un accidente entre dos vehículos de carga de pasajeros. Los conductores deben ser capaces de asumir la responsabilidad que lleva conducir un vehículo de tales dimensiones.

Otra cuestión a tener en cuenta es el estado técnico que presenten los mismos. Aspectos mecánicos como el fallo en los frenos, en la dirección, en la suspensión, falta de mantenimiento, exceso de carga, modificaciones inadecuadas o sobredimensionamiento del vehículo pueden ser motivo de desperfectos sobre la marcha. La responsabilidad de los conductores y dueños de vehículos en hacer revisiones periódicas a los mismos, ayuda a una correcta circulación y evita accidentes [3].

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 que 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 [6]:

- 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 [6]:

- 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.

La otra parte de los usuarios de la vía transita como peatones, y se encuentran en una posición de desventaja ante los conductores de vehículos. Las características de estos también pueden modificar el correcto desempeño de configuraciones de señalizaciones implementadas.

Se conoce como peatón a toda aquella persona que no ejerce papel de conductor en la vía pública y se encuentra por lo general simplemente transitando por ella, cuyo comportamiento está definido por su propia naturaleza humana y sus rasgos propios como individuo. Es importante investigar los factores que pueden marcar la conducta del peatón, lo que lo induce a arriesgarse para así poder obtener una implementación cuyos resultados se asemejen un poco más a la realidad. El género, la experiencia al volante, la edad [7], así como el estado anímico son algunos de los elementos influyentes sobre la percepción del riesgo de las personas y, por tanto, en la toma de decisiones de las mismas.

Género: Los estudios de la influencia del género en la percepción del riesgo de forma generalizada dan como resultado que las mujeres perciben el riesgo de forma mucho mayor a los hombres[8], y aunque existe la disputa de si esta diferencia es biológica o no, varios estudios [9] llegan a la conclusión de que se trata de un subproducto de los roles de género impuestos por la sociedad. Según un estudio realizado por Hendrik Anderson y Peter Lundorg [8] los hombres subestiman el riesgo más que las mujeres, teniendo estas un umbral de percepción un 28% mayor en comparación.

Experiencia de conducción: Otra de las características que afectan a la comprensión del riesgo de atropello es la experiencia al conducir. Por lo general los individuos que manejan poseen una percepción

que les ayuda a formar una imagen más detallada de las situaciones de riesgo, esto gracias a la experiencia previa en situaciones de peligrosidad de mayor complejidad en entornos urbanos[10].

Edad: Cabe destacar la edad como un influente en la conducta. Los jóvenes presentan una actitud más positiva a la hora de cruzar la calle a mediados de cuadra y tienen menor percepción del control conductual, lo que hace que tengan una mayor predisposición a cruzar bajo condiciones riesgosas[7], por lo que suelen aprovechar más los intervalos ajustados para cruzar, mientras que los adultos mayores sobreestiman el riesgo de las situaciones, siendo el grupo que menos accidentes ocasiona en la vía los mayores de 59[7], más específicamente entre los 66 y 75 años [11].

Desgraciadamente existe un número no despreciable de animales que habitan en las calles, tratando de sobrevivir pasando frío, lluvias, hambre, y otras tantas miserias. Estos animales son parte de la vía e interrumpen la circulación de los vehículos frecuentemente. En ocasiones, por despreocupación o por no tener tiempo suficiente para maniobrar los vehículos terminan atropellándolos, quedando lastimados y en el peor de los casos muertos. Por parte de los conductores también supone un peligro pues al intentar salvar a estos animales realizan giros bruscos y apresurados que pueden terminar en un colapso o un accidente [3].

Es importante definir que cuando se trata de animales en contraposición con el tránsito, existen 2 grandes subgrupos de la fauna, la urbana y la rural, siendo esta última el mayor detonante de las dos, ya que los animales de ciudad, en su mayoría callejeros, poseen una mejor percepción del peligro en las calles que el ganado que constituye la mayor parte de los animales rurales, sin embargo, poco se ha estudiado este fenómeno con debido detenimiento en Cuba.

Además de los factores que están directamente relacionados con los usuarios de la vía y los vehículos en los que transitan, existen otros factores que influyen en el actuar de los mismos.

El pavimento es la capa constituida por uno o varios materiales que se coloca sobre el terreno natural o nivelado, para aumentar su resistencia y servir para la circulación de personas o vehículos [12, 13].

Como parte principal de la vía el estado físico del pavimento es decisivo en el comportamiento de los vehículos que por él transitan. El deterioro del mismo, especialmente la presencia de baches, genera crecientes restricciones de capacidad y aumenta la congestión. La lluvia acumulada sobre las calzadas reduce la capacidad de las vías y también genera congestión [14]. Por otra parte, las carreteras desgastadas se vuelven peligrosas a pesar de no tener baches, pues la lluvia provoca deslizamientos a los vehículos que, por ende, colisionan.

Los conductores cubanos, familiarizados ya con el estado de las carreteras, ante los desperfectos del pavimento disminuyen su velocidad, en ocasiones de manera brusca, provocando también accidentes por vehículos que los seguían en el mismo carril.

Existen características adversas enmarcadas a condiciones de la vía, que pueden aumentar el nivel de exigencia del conductor, así como el riesgo en diferentes acciones, sin embargo, adicional a las características geométricas de la zona de circulación, se encuentran las condiciones climáticas que, desde leves aumentos en la temperatura, golpes de vientos fuertes y lluvia, pueden alterar la normal conducción y conllevar fácilmente a la ocurrencia de un siniestro en la vía [15, 16].

Con la lluvia las condiciones de visibilidad disminuyen, los parabrisas se empañan internamente y dificulta la detección de vehículos y personas en la vía. La visibilidad de los conductores también puede

verse afectada por la humedad y la neblina. Así mismo, los neumáticos pierden adherencia y la rueda tiende a patinar sobre el agua con poco contacto al pavimento [3].

Ante altos grados de temperatura, que se reflejan aún más cálidos en el interior de los vehículos, los conductores manifiestan conductas de desesperación por arribar a su destino, desobedeciendo sobre la marcha las señales de tráfico que se les interpongan, y como es de suponer también aumentan su velocidad, siendo así más propensos a provocar o sufrir accidentes.

También es determinante el instante del día. En horas de la mañana y la tarde los conductores suelen estar más atentos a lo que sucede en la vía; no obstante, en las noches y la madrugada, como el flujo de vehículos es menor los conductores se relajan y dejan de prestar atención a las señales, y de esta manera son causantes potenciales de accidentes.

Las malas configuraciones de las señales en la vía son aquellas que, lejos de organizar el transporte, lo obstaculizan. Se realizan sin tener certeza del impacto que tendrán en la práctica. Cuando se pone en funcionamiento una mala configuración de cierta señalización vial, las afectaciones ocurrentes son proporcionales a la demanda de vehículos que tenga la carretera en cuestión. Las consecuencias que traen las mismas pueden provocar desde una molesta contaminación sonora, hasta acabar con la vida de un ser humano.

Los embotellamientos o colapsos del tránsito son aglomeraciones excesivas de vehículos en espera por la luz del semáforo o por otros vehículos. Ellos constituyen una de las principales afectaciones que genera la mala configuración de los semáforos. Una situación como esta fue instanciada en octubre de 2015, en la Ciudad Deportiva, La Habana, Cuba. En esa fecha se aprobó y puso en ejecución un proyecto que consistía en instalar un semáforo en cada acceso a la rotonda de la Ciudad Deportiva. Como es evidente, se requirió hacer uso de recursos económicos y humanos. Este proyecto fue conocido por su impacto totalmente contraproducente. Provocó una enorme congestión en las vías por más de 25 minutos dejando automóviles varados encima del paso a nivel ferroviario y obstaculizaban la entrada del Hospital Clínico Quirúrgico de 26. La decisión de las autoridades relacionadas fue inhabilitar los semáforos cuando habían pasado apenas 72 horas de su puesta en funcionamiento.

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) [17].

Los accidentes de manera general, constituyen la quinta causa de muerte en Cuba como muestra la Figura 1, y representan alrededor del 5.9% del total de fallecidos [18].

PRINCIPALES CAUSAS DE MUERTE EN CUBA

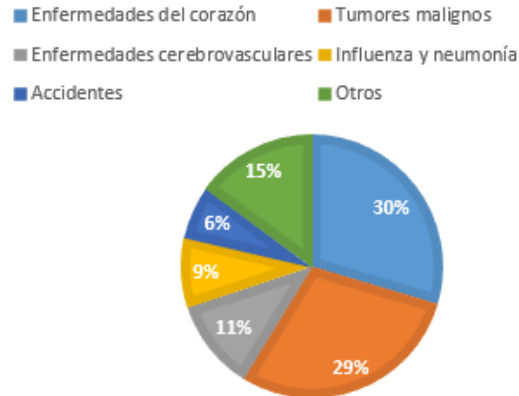


Fig.1 Principales causas de muerte en Cuba

Por esta causa se reportan 5,2 años de vida potencialmente perdidos por cada 1000 habitantes. De todos los accidentes que ocurren anualmente en Cuba, una gran parte están relacionados con la desobediencia de los conductores respecto a los semáforos. Estos datos se pueden corroborar gracias a la Oficina Nacional de Estadísticas e Información de la República de Cuba, ONEI [11].

La Figura 2 es un reporte por causas de los accidentes en Cuba, donde se muestran las causas más importantes, en relación con las cantidades de los años 2017 y 2018.

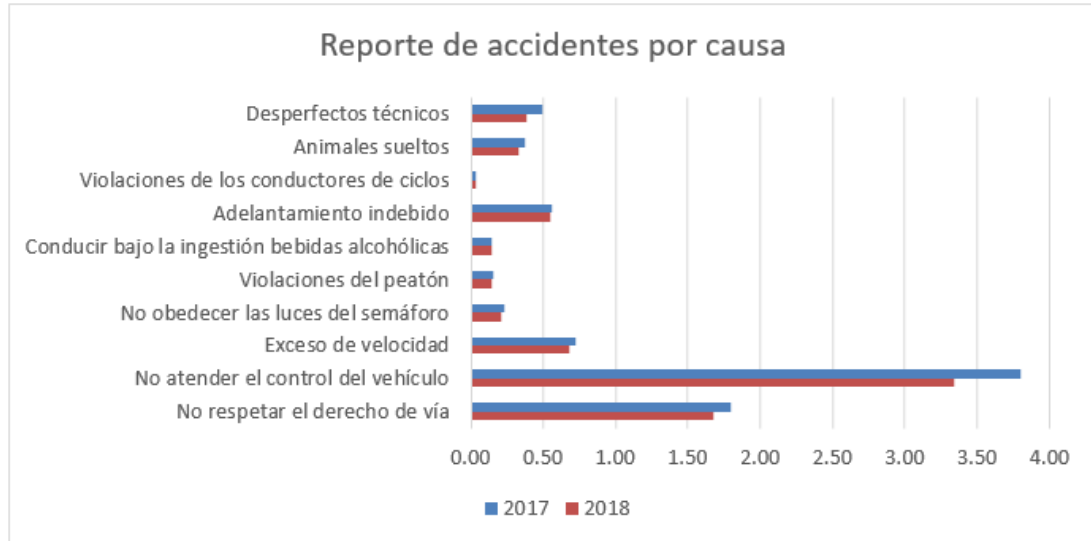


Fig.2 Reporte de accidentes por causa en Cuba

Aquí se puede apreciar que no respetar el semáforo y demás señales en la vía, los excesos de velocidad y la distracción de los conductores constituyen unas de las más frecuentes causas de accidentes.

3. Sistemas Inteligentes y Simulación para el control del tráfico

Simulación Basada en Agentes

Según Wooldridge [2], 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” [2]. Se muestra en la Figura 3 un resumen del comportamiento de un agente inteligente.

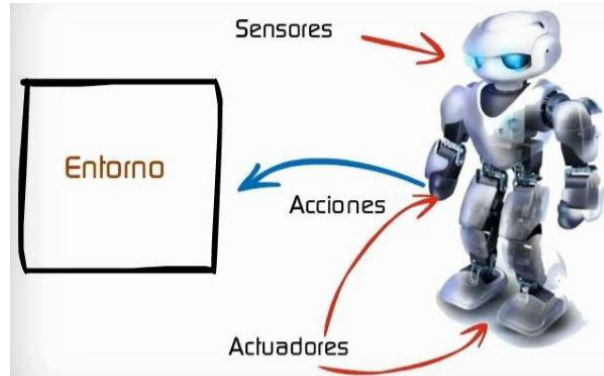


Fig.3 Comportamiento de un agente inteligente

El paradigma de agentes se puede considerar como una extensión intrínseca de la orientación a objetos, mediante la cual un agente representa un objeto que tiene control sobre su ejecución [19]. De forma general, varios autores reconocen en los agentes diversas propiedades, entre las que se destacan el ser autónomos, reactivos, proactivos y tener habilidad social [20].

Los Sistemas Multi-Agente (MAS, *Multi-Agent Systems*), son conjuntos de agentes que interactúan entre sí, mediante el intercambio de mensajes. Los agentes poseen diferentes metas y motivaciones. En orden de interactuar satisfactoriamente y lograr sus objetivos, requieren las habilidades de cooperar, coordinar y negociar entre ellos [2].

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 la ABS es modelar sistemas complejos que adoptan un enfoque ascendente a partir de los agentes individuales [21]. Un enfoque concreto de la 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 [22].

En el mundo se han desarrollado varias herramientas de simulación que son utilizadas para resolver 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. El simulador

THE [23], implementado en Pakistán 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 [24] 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 [25]. 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.

Modelos Matemáticos

Un modelo matemático es un modelo que utiliza fórmulas matemáticas para representar la relación entre distintas variables, parámetros y restricciones. Los modelos matemáticos son utilizados para analizar la relación entre dos o más variables. Pueden ser utilizados para entender fenómenos naturales, sociales, físicos, etc. Dependiendo del objetivo buscado y del diseño del mismo modelo pueden servir para predecir el valor de las variables en el futuro, hacer hipótesis, evaluar los efectos de una determinada política o actividad, entre otros objetivos [26].

Cuando se diseña un modelo matemático, se busca que este tenga un conjunto de propiedades que ayude a asegurar su robustez y efectividad. Entre estas propiedades se encuentran [26]:

- Simplicidad: Uno de los objetivos principales de un modelo matemático es simplificar la realidad para poder entenderla mejor.
- Objetividad: Que no tenga sesgos ni teóricos ni de los prejuicios o ideas de sus diseñadores.
- Sensibilidad: Que sea capaz de reflejar los efectos de pequeñas variaciones.
- Estabilidad: Que el modelo matemático no se altere significativamente cuando hay cambios pequeños en las variables.
- Universalidad: Que el modelo sea aplicable para varios contextos y no sólo a un contexto en particular.

Los modelos matemáticos se clasifican según diferentes aspectos que se presentan a continuación:

Según tipo de representación:

- Cualitativos o conceptuales: Se refieren a un análisis de la calidad o la tendencia de un fenómeno sin calcular un valor exacto.
- Cuantitativos o numérico: Los resultados obtenidos tienen un valor concreto que tiene un cierto significado (puede ser exacto o relativo).

Según la aleatoriedad:

- Determinista: No tiene incertidumbre, los valores son conocidos.

- Estocástico: No se conoce con exactitud el valor de las variables en todo momento. Existe incertidumbre y por ende una distribución de probabilidad de los resultados.

Según su aplicación u objetivo:

- Simulación o descriptivo: Simula o describe un fenómeno. Los resultados se enfocan a predecir qué sucederá una determinada situación.
- Optimización: Se utilizan para encontrar una solución óptima a un problema.
- De control: Para mantener el control de una organización o sistema y determinar las variables que deben ajustarse para obtener los resultados buscados.

El modelo matemático puede decir entonces que el problema es elegir los valores de las variables de decisión de manera que se maximice la función objetivo, sujeta a las restricciones dadas. La determinación de los valores apropiados que deben asignarse a los parámetros del modelo, un valor por parámetro, es una tarea crítica y a la vez un reto en el proceso de construcción del modelo [1].

Para el estudio del fenómeno del tránsito el uso de un modelo matemático acompañando a la simulación podría brindar mejores resultados, utilizando como variables de decisión todas aquellas que los analistas de tránsito tengan en cuenta para un proyecto de señalización, como puede ser el tiempo de cada luz del semáforo, la velocidad de las vías que intervienen en la intersección, entre otras. El modelo iría en busca de minimizar la cantidad de accidentes y el tiempo de espera de los vehículos en la vía.

Existen investigaciones que han logrado crear modelos matemáticos para el comportamiento de determinadas situaciones en el tráfico. El artículo [27] propone un modelo matemático para el tráfico de las metrópolis, que puede optimizarse aún más para controlar el tráfico de forma eficiente. Este modelo tiene en cuenta todos los parámetros que pueden tener un efecto en el tráfico, por ejemplo, tasas de escape de intersecciones y caminos. El artículo [28] presenta un modelo matemático para optimizar los flujos de tráfico en un entorno urbano basado en un enfoque estocástico. Permite optimizar los flujos de tráfico mediante un algoritmo genético cambiando las fases de funcionamiento de los semáforos. Revela la relación entre la intensidad del servicio del flujo de tráfico y el tiempo de la señal verde del semáforo. En [29] se considera el desarrollo de un modelo matemático de TSM (Traffic Safety Management) teniendo en cuenta las oportunidades de las tecnologías Web. El modelo dinámico analítico se basa en la ley de mantenimiento de la integridad del objeto. El desarrollo del sistema sobre la base del modelo propuesto mejorará la eficiencia del TS y garantizará la consecución del objetivo de gestión.

Modelos basados en comportamiento peatonal

Los modelos de simulación que se basan en agentes con procesos sociales asumen que las sociedades son artificiales, por lo que las estructuras sociales fundamentales y los comportamientos grupales emergen de la interacción de operadores individuales en un ambiente artificial bajo reglas de decisión sencillas [30]. Los agentes poseen racionalidad limitada y las sociedades artificiales que son creadas en laboratorios son entornos ideales para que crezcan ciertas estructuras con las que descubrir mecanismos locales o microscópicos que representan la base para generar estructuras macro sociales y comportamientos colectivos de interés [31]. El modelado computacional basado en agentes es una herramienta para investigación empírica que permite someter a prueba teorías. Las características de los modelos computacionales basados en agentes son [32]:

- Heterogeneidad; Las poblaciones de los agentes pueden ser diferentes en innumerables formas- genéticamente, culturalmente, relaciones sociales, por preferencias- dichas diferencias pueden cambiar o adaptarse endógenamente en el tiempo.
- Autonomía; No hay un control central sobre el comportamiento en los agentes modelados, o control de arriba hacia abajo.
- Espacio explícito; todos los eventos ocurren en el espacio específico.
- Interacciones locales; típicamente los agentes interactúan con sus vecinos en un espacio definido.
- Racionalidad limitada; los agentes no tienen información global, los agentes no tienen poder computacional infinito. Por lo que siguen simples reglas.

Una de las tareas más relevantes en el modelado basado en agentes es decidir cuáles son los aspectos de mayor relevancia en el comportamiento e interacción de la sociedad artificial[33]. Para estudiar esto, se ha usado la noción de estructura social, donde la colectividad como un todo no es idéntica a la suma de los individuos que la conforman, pero la suma de las relaciones entre los individuos se comporta como un todo[33].

Al igual que en muchos ámbitos de simulación, para la simulación de personas existe una gran cantidad de modelos que tienen como objetivo reflejar de la forma más real posible el problema. Uno de estos modelos es el descrito en [34], en el que el comportamiento peatonal se ve reducido a llamadas “fuerzas”, medidas para alimentar la motivación interna de cada individuo, las cuales describen la aceleración hacia la deseada velocidad de movimiento, la distancia que el peatón guarda de otros peatones y objetos y efectos de atracción ejercidos sobre el individuo [35]. También son muy empleados modelos macroscópicos basados ecuaciones diferenciales, pero dichos sistemas desprecian el comportamiento individual dentro de la simulación. Se valora que la flexibilidad de los sistemas microscópicos los vuelve más convenientes para la simulación de los eventos granulados [35], por lo que el modelo actual basado en agentes es estimado conveniente, aunque en un futuro podría no ser así, pues la dinámica unidimensional descrita se aleja un poco de la libertad que puede brindar un terreno bidimensional para una persona.

Modelos basados en lógica difusa

La incertidumbre en algunos casos se debe a ausencia de información o desconfianza en la fuente de la misma, pudiendo en algunos casos asociarse esta a un valor subjetivo y en otros casos dándole un significado probabilístico (asociado a la probabilidad de ocurrencia del fenómeno analizado). Sin embargo, en determinadas ocasiones, la incertidumbre se presenta en casos en que la información es totalmente confiable, pero el problema está en que no se sabe bien cómo clasificar la información recibida. Por ejemplo, es muy difícil asignar valores de verdad absolutos para clasificar a los individuos en Altos, Delgados o Alegres. La teoría de los conjuntos difusos es un instrumento útil en estos casos, para la especificación de lo bien que un objeto satisface una descripción vaga [36].

La teoría de los conjuntos difusos no es un método para razonamiento incierto en absoluto. Mejor dicho, la teoría de los conjuntos difusos trata los clasificadores como predicados difusos y dice que el valor de verdad es un número entre 0 y 1, en vez de un verdadero o falso exacto. El nombre “conjunto difuso” proviene de la interpretación del predicado como la definición implícita de un conjunto de sus miembros (un conjunto que no tiene fronteras delimitadas) [36].

Los conjuntos difusos están compuestos por varios elementos que se detallan a continuación [37] y se ilustran en la Figura 4.

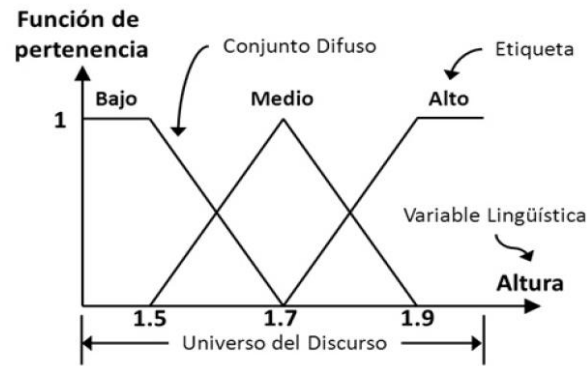


Fig.4 Elementos de un conjunto difuso

Variables lingüísticas: Concepto que se califica de forma difusa. Es el nombre que se le confiere al conjunto difuso. Se le denomina lingüística ya que se definen sus características mediante el lenguaje hablado.

Universo del discurso: Representa el rango de valores que puede tomar los elementos que posee la propiedad expresada por la variable lingüística.

Etiquetas: Se detalla como una de las clasificaciones que tiene la variable lingüística, por lo tanto, cada etiqueta pertenece a una variable lingüística, y se asocia a un conjunto difuso. Esto generalmente se traduce en que las etiquetas son adjetivos que caracterizan a un sustantivo que sería la variable lingüística.

Dominio: El dominio da el rango de definición de la función de pertenencia. Es una manera de restringir el universo del discurso de cara a cada etiqueta.

Función de pertenencia: La Función de Pertenencia es un elemento esencial en la definición de los conjuntos difusos. Asocia a cada elemento de un conjunto difuso el grado con que pertenece a la etiqueta asociada. En los conjuntos clásicos los elementos están o no. Las funciones de pertenencia más usadas son las de tipo Triangular, Trapezoidal, Gaussiana (en forma de campana) y Sigmoidal [37].

La lógica difusa es así un sistema de operatividad de la verdad, un hecho que causa serias dificultades [36]. Es multivaluada y permite representar matemáticamente la incertidumbre y la vaguedad, proporcionando herramientas formales para su tratamiento [38]. En general la lógica difusa se aplica a sistemas de control y para modelar cualquier sistema continuo de ingeniería, física, biología o economía.

Existen aplicaciones de la lógica difusa también en la resolución de problemas relacionados con el tráfico. En [39] se representa cómo el sistema controlador de lógica difusa es más efectivo y tiene mejor desempeño que el sistema controlador convencional con efecto costo en el campo de la toma de decisiones para controlar el tráfico. El objetivo principal del trabajo es sensibilizar a todas las personas sobre los beneficios de utilizar la técnica de lógica difusa en el campo del sistema de control de tráfico. En el artículo presentado en [40], se desarrolló un controlador de semáforo inteligente utilizando una técnica de lógica difusa e ilustró un procedimiento de control utilizando reglas si – entonces.

El objetivo de [41] es proporcionar un marco para un sistema de transporte inteligente que será capaz de regular el tráfico de manera eficiente considerando diferentes factores como la distancia entre origen y destino, condiciones climáticas locales, día de la semana y la hora a la que una persona está viajando.

Incluir el número de parámetros ayudará al sistema a tomar la decisión inteligente. Esto se logra combinando regresión logística y lógica difusa, lo que hará un mejor sistema de gestión de tráfico adaptativo.

Sistemas de Información Geográfica

Los Sistemas de Información Geográficos (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 [42].

Están compuestos por una serie de elementos, donde los datos espaciales son esenciales debido a que contienen la información geográfica necesaria para el funcionamiento de estos sistemas. Esta información puede ser almacenada tanto en ficheros como en bases de datos espaciales, utilizándose para dicho fin varias tecnologías, y las más comunes son las bases de datos relacionales [43].

La cobertura de datos se extiende al conjunto de todos los países del mundo, siendo esta cada vez mayor en las regiones emergentes del planeta. El crecimiento es sorprendentemente constante, lo que significa una gran cantidad de personas trabajando activamente en aportar datos al mapa.

De los GIS la simulación puede obtener atributos determinantes para la misma, como son la dirección y sentido de las calles por donde transitarán los vehículos, la cantidad de carriles de cada calle, la longitud y costo de la misma para ser utilizada por los conductores para calcular la ruta más corta hacia su lugar de destino, el tipo de calle que es importante para conocer la velocidad máxima de la misma según lo dictado por [6], entre muchos otros. La ejecución de una simulación de tráfico usando mapas reales es de vital importancia porque permite a los ingenieros y analistas de tránsito observar el comportamiento de los individuos en las mismas intersecciones donde planifican colocar las señalizaciones.

Actualmente es común utilizar sistemas de información geográfica en las simulaciones basadas en agentes, aún más en las destinadas al tráfico, para obtener de los mapas reales las características donde se desarrollan los vehículos y personas. En Vietman, se realizó un estudio de caso que comprendía la utilización de un GIS para simular la creación de rutas de transporte para el tránsito de los vehículos de servicios comunales que trasladan los desechos sólidos de la comunidad. El objetivo era lograr una ruta óptima que cubriera la mayor cantidad de sitios de desechos posibles reduciendo el costo por las operaciones de recolección y transporte [44]. El trabajo presentado en busca agrupar accidentes de tránsito para comprender los patrones que lo provocan, utilizando técnicas de minería de datos, y para ellos utiliza la ubicación de los accidentes con sus coordenadas “x” y “y” en un GIS [45].

4. Conclusiones

En este trabajo fue presentado un estudio de como la simulación basada en agentes y otras técnicas de inteligencia artificial pueden contribuir al proceso de colocación de controladores de tráfico y otras señalizaciones viales. Al concluir el mismo se puede concluir que las malas configuraciones de las señales en la vía traen como consecuencia embotellamientos, accidentes y contaminación ambiental. El comportamiento de los usuarios de la vía está condicionado por factores externos como son el estado del pavimento, las características y el estado técnico de los vehículos en los que transitan, la temperatura ambiental, los peatones y animales que interrumpen la vía y la experticia de los usuarios del tráfico. La Simulación Basada en Multi-Agente es un método eficaz para describir sistemas complejos como el

transporte, y analizar y comprender el comportamiento de los mismos. La lógica difusa ayudará a escalar los niveles de experticia de los conductores y los peatones. La confección de un modelo matemático que apoye a la simulación es de gran importancia para la comprensión de la misma. Para la captura, almacenamiento, manipulación y análisis de información geográfica se utilizan los GIS, que son útiles para realizar simulaciones en mapas geolocalizados reales. Es necesario un mecanismo de evaluación más real para las configuraciones semafóricas que permita conocer el funcionamiento que tendrán las señalizaciones viales una vez colocadas combinando todas las técnicas estudiadas.

Referencias

1. Hillier, F.S. and G.J. Lieberman, *Introduction to Operations Research*. 9th ed 2010, Madrid: McGraw-Hill.
2. Woolridge, M., *An Introduction to MultiAgent Systems*. 2nd ed 2009, Departament of Computer Science, University of Liverpool: John Wiley & Sons.
3. Moreno Román, A.C., *Herramienta de simulación para evaluar condiguraciones de señalizaciones en redes viales*, in *DIAISI*. 2021, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", CUJAE: La Habana. Pregrado. Disponible en: <https://repositorio.cujae.edu.cu/items/03d01c9f-e8d7-4955-980e-a779146369a7>.
4. Transporte, C.e.p.E.D.d. *Señalización vial*. in *Convención sobre la Señalización Vial*. 2007. Naciones Unidas.
5. Newstead, S., *An investigation into the relationship between vehicle colour and crash risk*. Monash University. Accident Research Center, 2007. Disponible en: <https://www.monash.edu/muarc/archive/our-publications/reports/muarc263>.
6. León, A.M.d., *Código de Seguridad Vial* 2016, La Habana: Editorial Capitán San Luis.
7. Romero, D.J., *Comportamiento Peatonal* 2010, Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil.
8. Anderson, H. and P. Lundborg, *Perception of own death risk. An analysis of road-traffic and overall mortality risks*. Risk Analysis, 2007. **31**(7): p. 1069-1082.
9. Menéndez, S., *La diferencia entre hombres y mujeres, ¿biológicas o sociales?* Bekia Psicología, 2011.
10. Flynn, J., P. Slovic, and C.K. Mertz, *Gender, Race and Perception of Enviromental Health Risks*. Risk Analysis, 1994. **14**(6). DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1994.tb00082.x>.
11. ONEI *Estadísticas de Oficina Nacional de Estadísticas e Información*. . Oficina Nacional de Estadísticas e Información, 2020. Disponible en: <http://www.onei.cu>.
12. RAE, *Diccionario de la Lengua Española* 2014, Madrid, España: Real Academia Española.
13. Nacional, R., *¿Cómo el país se propone impedir el deterioro de las vías?* Periódico Granma, 2019.
14. Thompson, I. and A. Bull, *La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales*. Recursos Naturales e Infraestructura, 2001. Disponible en: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/6381-la-congestion-transito-urbano-causas-consecuencias-economicas-sociales>.
15. Colombia, C., *Conducir bajo la lluvia aumenta el riesgo en las vías*. Auto Crash, 2018. **48**.
16. de la Casa, A. and A.C. Ravelo, *Assessing temperature and humidity conditions fot dairy cattle in Cordoba, Argentina*. Int. J. Biometeorol, 2003. **48**(1): p. 6-9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00484-003-0179-x>.
17. Fraga, D.B., *Herramienta de Simulación Basada en Agentes para la evaluación de configuraciones semafóricas en redes viales*, in *DIAISI*. 2018, Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría, CUJAE: La Habana. Pregrado. Disponible en: <https://repositorio.cujae.edu.cu/items/ad31ec5b-7e84-475e-8aa6-18ccaca1ed76>.
18. Salud Pública, M. *Anuario Estadístico de Salud*. Anuario Estadístico de Salud, 2016.

19. Zead, A. *A uml profile for agent-based development*. in *International Symposium on Metainformatics*. 2003. DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-44872-1_17.
20. Espino, M.M., *Patrones para incorporar proactividad en sistemas informáticos* in *DIAISI*. 2013, Instituto Superior Politécnico, José Antonio Echeverría, CUJAE: La Habana. Doctorado. Disponible en: <https://repositorio.cujae.edu.cu/items/2616ed75-e632-49a0-8257-c5f8c5665490>.
21. Moon, Y.B., *Simulation modelling for sustainability: a review of the literature*. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2017. **10**(1): p. 2-19. DOI: <https://doi.org/10.1080/19397038.2016.1220990>.
22. Abar, S., et al., *Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software*. *Computers Science Review*, 2017. **24**: p. 13-33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.03.001>.
23. Farooqi, A.H., A. Munir, and A.R. Baig, *The: traffic light simulator and optimization using genetic algorithm*. *International Conference on Computer Engineering and Applications*, 2011. **2**.
24. Castán, J.A., et al., *Control de tráfico basado en agentes inteligentes*. Polibitis, 2014. **50**. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-90442014000200010.
25. Sarkar, N.C., et al., *Microscopic modelling of area-based heterogeneous traffic flow: Area selection and vehicle movement*. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, 2020. **111**: p. 373-396. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.12.013>.
26. Roldán, P.N., *Modelo matemático*. Economipedia, 2020. Disponible en: <https://economipedia.com/definiciones/modelo-econometrico.html>.
27. Khorani, V., F. Razavi, and V.R. Disfani, *A Mathematical Model for Urban Traffic and Traffic Optimization Using a Developed ICA Technique*. *IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS*, 2011. **12**(4): p. 1024-1036. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2127475>.
28. Kasatkina, E.V. and D.D. Vavilova, *Mathematical modeling and optimization of traffic flows*. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. **2134**. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2134/1/012002>.
29. Burlov, V. and M. Grachev, *Development of a Mathematical Model of Traffic Safety Management with Account for Opportunities of Web Technologies*. *Transportation Research Procedia*, 2017. **20**: p. 100-106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.01.023>.
30. Torres, Á.V., *Modelación y simulación basada en agentes en ciencias sociales: una aproximación al estado del arte*. Polis (Santiago), 2019. **18**(53). DOI: <https://doi.org/10.32735/S0718-6568/2019-N53-1392>.
31. Axtell, R. and J. Epstein, *Growing artificial societies. Social Science from the bottom up*1996, US: The Brookings Institution.
32. Epstein, J., *Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling*2007, Princeton University Press.
33. Ribeiro, M., A.C. Rocha, and R. Bordini. *A system of Exchange Values to support social interaction in Artificial Societies*. in *Proceedings of the International Conference on Autonomous Agents*. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1145/860575.860589>.
34. Helbing, D. and P. Molnár, *Social force model for pedestrian dynamics*. *Physical Review E*, 1995. **51**(5). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.51.4282>.
35. Hernández, J.E.V., *Modelo microscópico del movimiento peatonal basado en autómatas celulares y sistemas multiagentes*2014, Ciudad de México: Centro De Investigación En Computación, Instituto Politécnico Nacional.
36. Russell, S.J. and P. Norvig, *Artificial Intelligence. A Modern Approach*2010: Prentice Hall.
37. Luna, G.M., *Introducción a la lógica difusa*2002: Centro de Investigación y Estudios del IPN (CINVESTAV-IPN).
38. Morcillo, C.G., *Lógica difusa. Una introducción práctica*. Técnicas de Softcomputing2017.
39. S., A., D. KK, and C. R., *Fuzzy Logic: An Advanced Approach to Traffic Control*, in *Applications of Robotics in Industry Using Advanced Mechanisms*. ARIAM 2019. *Learning and Analytics in Intelligent Systems*2020, Springer: Charm. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-30271-9_17.

40. S.Mohanaselvi and B.Shanpriya. *Application of Fuzzy Logic to Control Traffic Signals*. in *AIP Conference Proceedings*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5112230>.
41. Tomara, A.S., et al., *Traffic Management using Logistic Regression with Fuzzy Logic*. *Procedia Computer Science*, 2018. **132**: p. 451-460. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.05.159>.
42. Capote Fernández, J.L. and T. Delgado Fernández, *Semántica espacial y descubrimiento de conocimiento para el desarrollo sostenible* 2009, La Habana: CUJAE. 21-32.
43. Kemp, K., *Encyclopedia of Geographic Information Science*. SAGE, 2008. Disponible en: <https://us.sagepub.com/en-us/nam/encyclopedia-of-geographic-information-science/book226890>.
44. Nguyen-Trong, K., et al., *Optimization of municipal solid waste transportation by integrating GIS analysis, equation-based, and agent-based model*. *Waste Management*, 2017. **59**: p. 14 - 22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.048>.
45. Shafabakhsh, G.A., A. Famili, and M.S. Bahadori, *GIS-based spatial analysis of urban traffic accidents: Case study in Mashhad, Iran*. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2017. **4**(3): p. 290-299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.05.005>.