



# **SIMULACIÓN DE FLUJO PEATONAL EN ESTACIONES DE TRANSPORTE PÚBLICO MASIVO A TRAVÉS DE MODELADO BASADO EN AGENTES (ABM)**

**Giovanny Andrés Piedrahíta Solórzano, Harol Arévalo Buitrago**

**Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano  
Bogotá, Colombia**

## **Resumen**

La operación y funcionamiento de componentes de transporte público masivo como las estaciones para el abordaje de buses o trenes dependen del tráfico de peatones generado en el espacio disponible, las zonas de espera, puntos de control, ubicación de puertas, y tiempos entre llegada y salida del medio de transporte; el tráfico, a su vez, depende del comportamiento individual y grupal de los peatones y pasajeros que transitan allí. La verificación desde el proceso de diseño requiere herramientas de visualización de este flujo de peatones para identificar puntos críticos que generen aglomeraciones e impacten negativamente los indicadores de operación esperados en la estación. En este artículo se presenta la simulación de flujo peatonal utilizando un modelo basado en agentes, y su aplicación en un caso de estudio de una estación prototipo para tren ligero diseñada para escenarios con limitaciones de espacio. La investigación incluye el modelado de los agentes, la validación de su funcionamiento, y la evaluación de la operación de la estación.

Los modelos basados en agentes (ABM) permiten abordar problemas como la predicción del comportamiento grupal e individual ante una situación nueva o al interactuar con otros, como en un sistema urbano, social, o biológico. En estos sistemas la interacción entre los individuos y con otros elementos es discontinua y no lineal, y su modelamiento a través de ecuaciones determinísticas puede resultar muy complejo y producir resultados poco realistas. Por esto, se seleccionó esta técnica de modelado para la simulación del flujo de peatones en el interior de la estación, y particularmente la metodología BDI (Belief, Desire and Intention), por su afinidad con las arquitecturas orientada a objetos, que facilita su implementación y escalamiento en términos de programación. Los modelos desarrollados fueron el de objeto, para describir su estructura de datos,

relaciones y operaciones; el dinámico, para describir estados, transiciones, eventos, e interacciones; y el funcional, para el flujo de datos durante la simulación.

La simulación desarrollada permite observar, medir y verificar el comportamiento de los agentes al interior de la estación, dados los parámetros de circulación de agentes según horas específicas, la cantidad de usuarios y trenes, y parámetros de ingreso y salida de la estación. La validez del modelo se ha evaluado respecto a las cifras reales que presenta una estación de Transmilenio en horas valle y pico, y respecto al juicio de expertos en el tema de tráfico y sistemas de transporte. Con el modelo validado, se toma como caso de estudio la propuesta de una estación de dos pisos conectados mediante escalera eléctrica, para evaluar si logra cumplir los requerimientos de operación de la zona específica en la que se pretende ubicar. La evaluación de este diseño a través de la simulación permitió identificar parámetros de operación y ajustes que la hagan viable, mejorando el proceso de planeación del sistema de transporte.

**Palabras clave:** flujo peatonal; sistemas multiagente; transporte público masivo

### **Abstract**

*The operation of mass public transport components, such as bus or train boarding stations, depends on the pedestrian traffic generated in the available space (lobby areas, control points, door locations) and times between arrival and departure of the means of transport. The traffic, in turn, depends on the individual and group behavior of the pedestrians and passengers who transit there. In the design process, the verification of how a pedestrian facility works requires visualization tools for the pedestrian flow to identify critical points that generate crowds and negatively impact the expected operating indicators at the station. This article presents the pedestrian flow simulation process using an agent-based model and its application in a case study of a light rail train (LRT) station designed for scenarios with space limitations. The research process includes modeling the agents, validating the operation of the model, and defining indicators to evaluate the station's operation.*

*Agent-based models (ABM) address problems such as the prediction of group and individual behavior in new situations that require interaction between individuals, such as in an urban, social, or biological system, where this interaction is discontinuous and non-linear, and its modeling through deterministic equations may be complex and produce unrealistic results.*

*For the pedestrian flow simulation inside the station, the BDI (Belief, Desire, and Intention) methodology has been selected since this paradigm collects what an agent must do in the context and is based on an object-oriented approach architecture. This approach eases its implementation and scaling in terms of development and programming. Three models were developed for the simulation: the object model, to describe its data structure, relationships, and operations; the dynamic model, to describe states, transitions, events, and interactions; and the functional one, for the data flow during the simulation.*



*The simulation allows to observe, measure, and verify the pedestrian' behavior, given the circulation parameters according to specific hours, the number of users and trains, and parameters of entry and exit from the station. The model was validated by comparing its results with the actual statistics reported for a Transmilenio station in peak and off-peak hours and the judgment of experts about traffic and the design of transportation systems. With the validated model, the study case was a two-story station proposed as an alternative for areas with space limitations to evaluate if it manages to meet the operation requirements of the specific area in which it is intended to be located. The evaluation of this design through simulation allowed to identify operation parameters and adjustments that make it viable, improving the transportation system planning process.*

**Keywords:** *pedestrian flow; multi-agent systems; mass public transport*

## 1. Introducción

El estudio del flujo de los peatones, particularmente en situaciones de aglomeración o de multitudes, ha sido objeto de interés e investigación por la cantidad de aplicaciones que tiene en el diseño y planeación de las ciudades, las cuales proyectan tener el 68% de la población mundial en el 2050 (United Nations, 2018). La comprensión del movimiento de sus habitantes en la infraestructura de la ciudad y de su comportamiento en situaciones que implican aglomeraciones permite un mejor diseño de instalaciones públicas como aeropuertos, estaciones de trenes y buses, corredores peatonales, o intersecciones de vías con cruces peatonales; no sólo para la comodidad de los usuarios sino para su seguridad.

Este interés por comprender, e incluso predecir, la manera en que un grupo de personas se mueve y se comporta en un espacio particular y ante unas condiciones definidas del entorno, ha llevado a múltiples propuestas respecto a los mecanismos que mejor lo modelan o describen. Esto incluye los trabajos iniciales que se desarrollaron para sistemas de transporte (Smith, 1995) o para eventos deportivos (Berlonghi, 1995) cuyo objetivo era principalmente la seguridad de la multitud en estos eventos; estudios para comprender el comportamiento de las multitudes en situaciones de pánico (Dell'Orco, Marinelli, & Ottomanelli, 2014), y los trabajos con experimentos controlados con grupos de peatones para analizar su comportamiento en corredores o cruces (Fu, Liu, Shi, & Zhao, 2021) orientados a la mejora en los diseños de senderos o rutas de peatones.

De una manera general se pueden establecer dos líneas de trabajo con las que se ha intentado describir el movimiento de los peatones; la primera corresponde a una aproximación de tipo *top-down* que permite llegar a ecuaciones generales para el flujo de peatones, aplicando conceptos propios de otras disciplinas y problemas que tienen similitud con el flujo de personas, particularmente en grandes aglomeraciones. La otra estrategia es de tipo *bottom-up*, en la que el fenómeno se logra describir a partir de sus componentes (peatones o personas, en este caso) y de un conjunto de reglas que ellos siguen. Ambas aproximaciones, cada una con sus ventajas según el contexto de aplicación, han llevado al desarrollo de simuladores y procesos experimentales para validarlos, y decisiones en el diseño de sistemas de gran escala, como el de tráfico en procesos de planeación urbana, y otros de menor escala, como los planes de evacuación en un auditorio.



En la medida que la primera aproximación utiliza ecuaciones determinísticas para predecir el movimiento, puede requerir una capacidad computacional menor que la segunda, en la que un algoritmo de decisión debe ser ejecutado tantas veces como componentes existan en el contexto de la simulación. Con la disponibilidad reciente de equipos con alta capacidad y herramientas de desarrollo que permiten la multiplicidad de instancias en una cantidad consistente con los requerimientos de estas simulaciones, el propósito de este trabajo es aplicar los conceptos y técnicas propias de los modelos basados en agentes para desarrollar simulaciones de escenarios de transporte público, particularmente, el flujo de peatones al interior de estaciones de transporte público masivo (Transmilenio, en la ciudad de Bogotá). Estas simulaciones permitirían analizar propuestas de diseño de estaciones nuevas como el caso de estudio planteado, en una zona con limitaciones de espacio para la cual el diseño de la estación propone dos niveles, el superior para acceso a la estación, y el inferior para el acceso a los buses.

En este documento se presentan referentes revisados respecto a las estrategias de simulación para peatones, las características de los sistemas multiagentes que los hacen atractivos para la modelación de sistemas complejos, los detalles del modelo propuesto, y los resultados de la simulación para su validación y para el análisis del caso de estudio planteado. Se identifican aquellos elementos de la estación que son susceptibles de mejorar su operación, y también el impacto de los parámetros del diseño en el desempeño de la operación llegando a valores adecuados para lograr la operación deseada.

## 2. Simulación de flujo peatonal

En relación con la primera aproximación para la simulación de flujo peatonal, de tipo *top-down*, uno de los trabajos más significativos se encuentra la propuesta del concepto de fuerza social (Helbing & Molnár, 1995), el cual se interpreta como una medida de las motivaciones internas de los individuos para realizar desplazamientos. Las validaciones de este modelo y sus posteriores revisiones han aprovechado material de video existente confirmando que las ecuaciones propuestas son capaces de predecir el movimiento de los peatones y los fenómenos de autoorganización en grandes multitudes, como la creación de filas de peatones como mecanismo de generación de rutas más rápidas para llegar al objetivo (Helbing, Buzna, Johansson, & Werner, 2005). Este modelo es implementado en Viswalk, uno de los paquetes más conocidos de simulación, con el que se han desarrollado una cantidad significativa de casos de estudio en diferentes ciudades del mundo (Campisi, Tesoriere, & Canale, 2018; Hagos, Adnan, & Yasar, 2020; Prabhu & Sarkar, 2016).

En esta misma línea se encuentra la propuesta de una teoría en el dominio continuo (Hughes, 2002) como marco teórico para el movimiento de una multitud de peatones, con un supuesto de comportamiento racional de tal multitud, con criterios de selección de rutas que minimicen el costo del trayecto, y con aplicaciones a casos con diferentes densidades de flujo a pasos de puentes y corredores. Posteriores revisiones (Huang, Wong, Zhang, Shu, & Lam, 2009) de esta propuesta buscan optimizar los algoritmos para hacerlos más eficientes y aplicarlos a simulaciones con multitudes de mayor magnitud.



Los trabajos desarrollados a partir de la descripción del comportamiento individual de los peatones (*bottom-up*) son más variados y suelen estar enfocados a casos de estudio localizados, o a la comprensión de fenómenos en situaciones específicas, generando una mayor cantidad de lo que se denomina “microsimulaciones”, refiriéndose al análisis de los individuos y su interacción con los diferentes componentes del sistema de tráfico. El aumento de este tipo de trabajos es consecuente con la diversidad de medios de transporte y la complejidad de sus sistemas asociados, que pueden incluir buses, trenes, automóviles, ciclas, y peatones. Con estas técnicas se proponen herramientas para la planeación de un sistema de transporte (Kagho, Balac, & Axhausen, 2020), o para estudiar la interacción entre el flujo peatonal y el tráfico de vehículos (Borsche & Meurer, 2019), o la proponer marcos de trabajo que integren el funcionamiento de múltiples modelos (Karbovskii, Voloshin, Karsakov, Bezgodov, & Gershenson, 2018). Un área de interés es la de planeación de rutas de evacuación y su evaluación en situaciones de pánico, en la que son esperados tanto contraflujos como cuellos de botella en las salidas, para identificar mecanismos que mejoren los tiempos y la seguridad de la evacuación (Chen, Fu, Fang, & Yang, 2019).

De acuerdo con los autores de los trabajos mencionados, ambos tipos de modelado son válidos y deben entenderse como complementarios, en cuanto permiten comprender dimensiones diferentes del mismo problema, y abordar escalas y fenómenos particulares en casos contextualizados. Importa describir con realismo suficiente el fenómeno observado y obtener conclusiones significativas con una comprensión real de lo sucedido.

### **3. Modelación basada en agentes**

Los modelos basados en agentes se caracterizan porque el sistema que representa está descrito como un conjunto de componentes individuales llamados agentes, que obedecen un conjunto de reglas de comportamiento para tomar decisiones (Bonabeau, 2002). Los agentes están situados en un entorno que también tiene un conjunto de atributos que modifican las decisiones de los agentes, y que de acuerdo con el sistema, podría ser a su vez afectado por tales decisiones. Aunque las reglas de comportamiento sean simples, los resultados del sistema en su conjunto pueden ser complejos, e incluso, estar en contravía de lo que predice la intuición y presentar patrones emergentes que no se podrían anticipar con ecuaciones determinísticas (Bonabeau, 2002). Un ejemplo de este punto es el resultado de analizar la cantidad de personas que salen sin lesiones de un auditorio ante una situación de evacuación. Intuitivamente se pensaría que la salida debería estar totalmente despejada, sin embargo, la simulación muestra que colocar un obstáculo frente a la salida de emergencia, como una columna, genera una mejor organización del flujo de personas y menos individuos salen lesionados.

Algunas de las características de los sistemas en los que el modelado basado en agentes es clave para identificar fenómenos de tipo emergente, está en que incluya individuos que puedan tomar decisiones de manera autónoma a partir de la información que reciben de un entorno, que la interacción entre sus los individuos sea no-lineal y discontinua, por lo que no tiene fórmula matemática para describirlo, o su definición puede ser muy compleja; y que contenga una población heterogénea donde el resultado de las decisiones autónomas, lleva a la formación de grupos y comportamientos no anticipados (Zhang & Han, 2011).



Teniendo en cuenta que un entorno en el que transitan peatones tiene las características mencionadas previamente, en este trabajo se propone la formulación de agentes que representen a los peatones, y las reglas que definen la interacción entre ellos y con el entorno. De las metodologías existentes para formular modelos basados en agentes, se escoge la BDI (Belief, Desire and Intention) (Kinny, Georgeff, & Rao, 1996), dado este paradigma recoge lo que un agente debe hacer en una simulación de cualquier tipo y se basa en una arquitectura orientada a objetos, lo que facilita su descomposición en modelos más detallados y su consecuente programación.

Como los modelos orientados a objetos tienden a manejarse por descomposición y abstracción, el sistema de tráfico de peatones se descompone mediante los objetos clave y centrados en su interacción con otras clases; así, los modelos a realizar son los siguientes:

- Modelo de Objeto, que se refiere a objetos dentro del sistema describiendo su estructura de datos, relaciones y operaciones.
- Modelo dinámico, que describe estados, transiciones, eventos, acciones, actividades e interacciones que caracterizan el comportamiento del sistema.
- Modelo funcional, que describe el flujo de datos durante la actividad del sistema tanto adentro como entre los componentes del sistema.

El contexto de aplicación del modelo son las estaciones de transporte público masivo, que para el caso de Bogotá, son las estaciones de Transmilenio, caracterizadas espacialmente por un área que está disponible tanto para tránsito de peatones como para la espera de los buses; los torniquetes de entrada y salida, y las áreas de ingreso y salida a los buses. Para generar un modelo simple, en términos de una cantidad mínima de componentes y de programación, y que a la vez, no quede limitada a la estructura actual de las estaciones, los modelos se formulan de la siguiente manera.

- Modelo de objeto: Se formulan inicialmente tres componentes del sistema de transporte, con las características presentadas en la tabla 1. Un componente adicional, que no hace parte como tal del sistema, pero necesario para la simulación, es aquél que captura y procesa los datos (administrador), resultando evidente en el modelo funcional.

Componente	Atributos	Relaciones
Estación	Los atributos de la estación están dados por su distribución física y por la ubicación de elementos internos de paso obligado por los peatones, denominados "checkpoints". El área en la estación está etiquetada en zonas transitables y en zonas restringidas.	Las restricciones de área propias de la estación restringen el movimiento de los peatones para que se mantengan dentro de ella y se desplacen por los puntos predefinidos.
Peatones	Los peatones se caracterizan por dos atributos físicos, su tamaño, y su velocidad. En las simulaciones el valor de estos atributos se genera aleatoriamente al momento de la creación del agente en el entorno.	Los peatones toman la información de las zonas transitables para aplicar un algoritmo de planeación de movimiento que busca la ruta más corta a un objetivo. Esta ruta es susceptible a variaciones según los obstáculos encontrados, como otros peatones más lentos o en espera del bus.

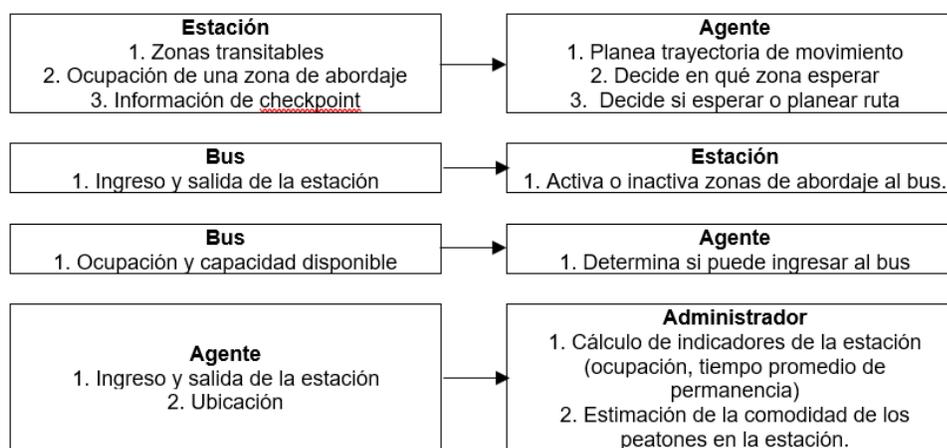


Buses	Los atributos de cada bus se refieren a su capacidad de pasajeros y a la cantidad y posición de sus puertas.	El bus genera una relación directa con la estación indicando disponibilidad para la apertura de puertas, y a su vez, el ingreso de pasajeros.
-------	--	---

**Tabla 1.** Componentes en el modelo de objeto. **Fuente:** Elaboración propia.

Los “*checkpoints*” mencionados en la tabla se definen como áreas dentro de la estación que son de paso obligatorio por los peatones, y que sirven para generar nuevos objetivos en la planeación de movimiento de cada peatón. Como *checkpoints* se categorizan los torniquetes de entrada, los puntos de ingreso al bus, o una zona intermedia en la que el agente decide a cuál puerta dirigirse basado en la información disponible de las posibles zonas de abordaje.

- Modelo funcional: El flujo de datos entre los componentes del modelo se muestra en la figura 1, con el detalle de cómo los usa el elemento receptor.



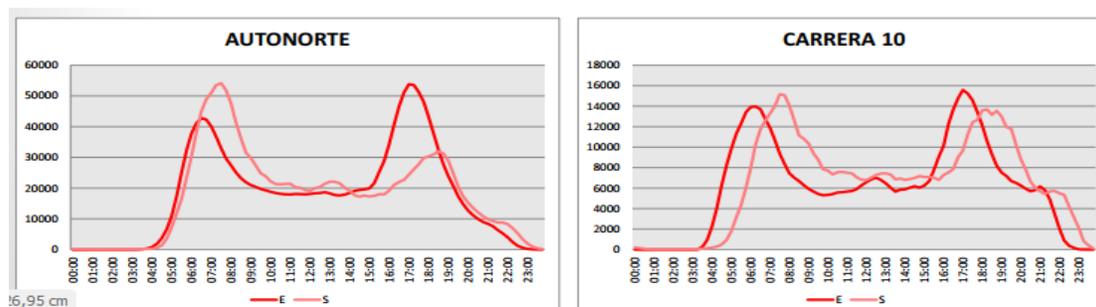
**Figura 1.** Modelo funcional con intercambio de datos. **Fuente:** Elaboración propia.

- Modelo dinámico: Este modelo es descrito en términos de máquinas de estado. Mientras que para la estación como tal no resulta necesario este modelo, por ser un generador constante de información para los peatones sin que cambie de estado, y el modelo correspondiente a los buses es muy sencillo por depender de la temporización configurada para la permanencia en la estación y los intervalos entre buses; el de cada peatón si tiene un poco más de complejidad. Sin embargo, el mismo proceso de toma de decisiones es aplicado a todos los peatones y por esto el modelo tiene un solo tipo de agente.

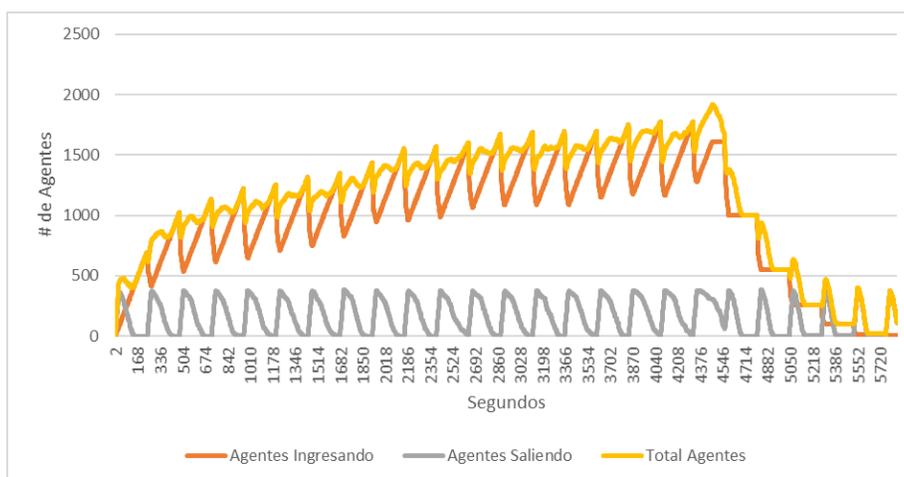
#### 4. Validación y resultados

La validación del funcionamiento de este modelo y de la interacción entre sus componentes fue realizado a través de la comparación de sus resultados con las estadísticas de ingresos y salidas de una estación de Transmilenio (TM) (SITP, 2014), y de la evaluación de expertos en sistemas de transporte. La figura 2 muestra gráficas de los promedios de entrada y salida para algunas troncales de TM en un día de operación normal. Los ingresos fueron tomados como insumo para calcular una tasa de generación de peatones que ingresan a la estación cada segundo y generar simulaciones con el equivalente a una hora de operación.





**Figura 2.** Gráficas de entrada/salida promedio en sistema TM. Fuente: (SITP, 2014)



**Figura 3.** Gráficas de entrada/salida, resultado de la simulación. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3 se muestra la gráfica resultante de ejecutar la simulación para una hora de operación en la que se observa el llenado de la estación y el tiempo que toma en evacuar esta cantidad de pasajeros, en tiempos correspondientes con la diferencia entre entrada y salida mostrada en las estadísticas. La evaluación de experto estuvo a cargo del Dr. Hernán Carvajal Osorio, quien tiene trayectoria en sostenibilidad y movilidad eléctrica, desarrollando propuestas de transporte urbano sostenible. Los resultados de simulación fueron contrastados de manera cualitativa, lo que llevó a la propuesta de diversidad de valores de atributos de velocidad individual para generar un escenario más realista, y la confirmación de los fenómenos de aglomeración en zonas específicas de la estación.

La estación seleccionada como caso de estudio (figura 3) fue propuesta por el mismo Dr. Carvajal, resultado de un proyecto de investigación en la Facultad de Ingeniería de la Universidad la Gran Colombia, relacionado con la alternativa de utilizar un sistema de transporte con tren ligero. La estación está compuesta por dos plantas, la inferior para acceso a la plataforma de tren ligero, y la superior, definida como una sala de espera y por la cual ingresan los peatones después de validar el tiquete de viaje, o salen al finalizar el trayecto. Ambas plantas se conectan mediante escaleras eléctricas automatizadas, a las que hay acceso restringido a los intervalos en que hay ingreso de tren a la estación. El propósito de este diseño es limitar la cantidad de pasajeros en espera en las plataformas y tener un ingreso y salida más controlado.





Agentes Ingresando	2000	2000	10000
Tiempo promedio de permanencia	4.12 minutos	6,8 minutos	8.33 minutos
Tiempo de evacuación	22.3 minutos	31.6 minutos	185 minutos
Intervalo entre trenes	2 minutos	3.5 minutos	3 minutos
Tiempo preapertura escaleras	30 segundos	45 segundos	45 segundos

**Tabla 2.** Resultados de la simulación. **Fuente:** Elaboración propia.

## 5. Conclusiones

El proceso realizado para modelar un sistema de transporte a partir de agentes ha permitido la implementación de un marco de simulación flexible que, sin cambios en su núcleo de programación, logra reproducir el tránsito de peatones en dos estaciones de transporte con condiciones de operación distintas. La simulación en un espacio físico continuo brinda mayor realismo a la visualización y evidencia fenómenos descritos por otros autores, como los de autoorganización y la formación de filas para llegar al destino. El modelo funcional permite un intercambio eficiente de datos entre los agentes y los otros componentes, emulando de cierta manera la información que un peatón capturaría a través de la visual que tiene de la estación y de su congestión, sin que implique un aumento en la cantidad de procesamiento por parte del agente, pues son variables disponibles para todos. En relación con el diseño de la estación para trenes, la simulación permite validar que existe un conjunto de condiciones de operación que hacen viable este diseño operacional respondiendo a una alta demanda de pasajeros, y que hay otras condiciones en las que la estación podría colapsar a menos que se den. Múltiples simulaciones permiten estimar los valores adecuados de parámetros como el intervalo entre trenes o evaluar el impacto de otros como el tiempo en que las escaleras permanecen activas antes de la llegada del tren.

## 6. Referencias

- Berlonghi, A. E. (1995). Understanding and planning for different spectator crowds. *Safety Science*, pp. 239-247.
- Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 99, pp. 7280–7287.
- Borsche, R., & Meurer, A. (2019). Microscopic and macroscopic models for coupled car traffic and pedestrian flow. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 348, pp. 356–382.
- Campisi, T., Tesoriere, G., & Canale, A. (2018). The pedestrian micro-simulation applied to the river Neretva: The case study of the Mostar "old bridge." *AIP Conference Proceedings*.
- Chen, S., Fu, L., Fang, J., & Yang, P. (2019). The effect of obstacle layouts on pedestrian flow in corridors: An experimental study. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Vol. 534, pp. 122333.
- Dell'Orco, M., Marinelli, M., & Ottomanelli, M. (2014). Simulation of crowd dynamics in panic situations using a fuzzy logic-based behavioural model. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, pp. 237-250.
- Fu, L., Liu, Y., Shi, Y., & Zhao, Y. (2021). Dynamics of bidirectional pedestrian flow in a corridor including individuals with disabilities. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Vol. 580, pp. 126-140



- Hagos, K. G., Adnan, M., & Yasar, A. ul H. (2020). Effect of sidewalk vendors on pedestrian movement characteristics: A microscopic simulation study of Addis Ababa, Ethiopia. *Cities*. Vol 103 pp. 201769.
- Helbing, D., Buzna, L., Johansson, A., & Werner, T. (2005). Self-organized pedestrian crowd dynamics: Experiments, simulations, and design solutions. *Transportation Science*, Vol. 39(1), pp. 1–24.
- Helbing, D., & Molnár, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, Vol. 51(5), pp. 4282–4286.
- Huang, L., Wong, S. C., Zhang, M., Shu, C. W., & Lam, W. H. K. (2009). Revisiting Hughes' dynamic continuum model for pedestrian flow and the development of an efficient solution algorithm. *Transportation Research Part B*. pp. 127–141.
- Hughes, R. L. (2002). A continuum theory for the flow of pedestrians. *Transportation Research Part B: Methodological*. Vol. 36(6), pp. 507-535.
- Kagho, G. O., Balac, M., & Axhausen, K. W. (2020). Agent-Based Models in Transport Planning: Current State, Issues, Expectations. *Procedia Computer Science*, Vol. 170, pp. 726–732.
- Karbovskii, V., Voloshin, D., Karsakov, A., Bezgodov, A., & Gershenson, C. (2018). Multimodel agent-based simulation environment for mass-gatherings and pedestrian dynamics. *Future Generation Computer Systems*, Vol. 79, pp. 155–165.
- Kinny, D., Georgeff, M., & Rao, A. (1996). A methodology and modelling technique for systems of BDI agents. *Lecture Notes in Computer Science Vol 1038*.
- Prabhu, T. D., & Sarkar, P. K. (2016). Pedestrian Warrants for Developing Countries by Simulation Approach. *Procedia Computer Science*. Vol 83, pp. 665-669
- Smith, R. A. (1995). Density, velocity and flow relationships for closely packed crowds. *Safety Science*. Vol 18, pp. 321-327.
- United Nations. (2018). World Urbanization Prospects 2018. In Department of Economic and Social Affairs. *World Population Prospects 2018*.
- Zhang, Q., & Han, B. (2011). Simulation model of pedestrian interactive behavior. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Vol. 390(4), pp. 636–646.
- SITP. (2014). Estadísticas de oferta y demanda del Sistema Integrado de Transporte Público – SITP. Consultado el 18 de octubre de 2019 en <https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/149180/estadisticas-de-oferta-y-demanda-del-sistema-integrado-de-transporte-publico-sitp/>.

## Sobre los autores

- **Giovanny Andrés Piedrahíta:** Ingeniero Electrónico, MSc en Ingeniería Electrónica de la Universidad de los Andes. Profesor Asociado. [gapedrahita@poligran.edu.co](mailto:gapedrahita@poligran.edu.co).
- **Harol Arévalo Buitrago:** Ingeniero de Sistemas, MSc en Ingeniería de Sistemas del Politécnico Grancolombiano. [haarevalo1@poligran.edu.co](mailto:haarevalo1@poligran.edu.co).

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2021 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

