



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Herramienta de simulación basada en agentes para la evacuación de edificios e instalaciones**

**Miguel Enrique Camargo Boyacá**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial

Bogotá D.C., Colombia

2019



# **Herramienta de simulación basada en agentes para la evacuación de edificios e instalaciones**

**Miguel Enrique Camargo Boyacá**

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Magíster en Ingeniería - Ingeniería Industrial**

Director:

Ingeniero Magíster Luis Gerardo Astaiza Amado

Línea de Investigación:

Sistemas basados en agentes

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial

Bogotá D.C., Colombia

2019



*A mi esposa y mis padres*



## **Agradecimientos**

Esta obra no se habría llevado a cabo sin el apoyo de Luis Gerardo Astaiza, profesor en la facultad de ingeniería de sistemas e industrial en la Universidad Nacional de Colombia, cuyas recomendaciones, motivación y experiencia permitieron que el proyecto llegara a buen término.





## Resumen

El estudio de la dinámica de multitudes ha sido abordado por múltiples disciplinas y a través de diferentes enfoques desde mediados del siglo pasado, propiciando edificios y eventos más seguros. Los modelos basados en agentes presentan numerosas ventajas frente a otros acercamientos y múltiples compañías han desarrollado herramientas de software para simular evacuaciones, sin embargo, este software tiene altos costos y requiere de conocimientos avanzados en el fenómeno de las multitudes lo que representa barreras para usuarios con necesidades de bajo alcance y recursos económicos y académicos limitados. En este documento se presenta un modelo basado en agentes para simular evacuaciones de espacios y poblaciones con características configuradas por el usuario, y se desarrolla un software que implementa el modelo y permite comparar alternativas cuantitativamente. Tanto la herramienta como su documentación están disponibles de forma gratuita por internet.

**Palabras clave:** Dinámica de multitudes, evacuación, simulación basada en agentes.

## **Abstract**

The study of the Crowd Dynamics has been approached by multiple disciplines and through different approaches since the middle of the last century, promoting safer buildings and events. Agent-based models have numerous advantages over other approaches and multiple companies have developed software tools to simulate evacuations, however, this software has a high cost and requires advanced knowledge in the phenomenon of crowds which represents barriers for users with low scope needs and limited economic and academic resources. In this document, a model based on agents is proposed to simulate evacuations of spaces and populations with characteristics configurated by the user, as well as a software that implements the model and allows to compare alternatives quantitatively. Both the tool and its documentation are available for free online.

**Keywords:** Crowd dynamics, evacuation, agent based simulation.

# Contenido

	Pág.
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>VII</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>IX</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>X</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas.....</b>	<b>XVII</b>
<b>Vocabulario.....</b>	<b>XIX</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>Objetivos.....</b>	<b>5</b>
<b>1. Dinámica de multitudes.....</b>	<b>7</b>
1.1 El individuo, el grupo y su entorno.....	8
1.2 Casos básicos de movimiento.....	11
1.3 Comportamientos emergentes.....	12
1.4 Medidas de desempeño.....	20
1.5 Recomendaciones.....	23
<b>2. Acercamientos al problema.....</b>	<b>25</b>
2.1 Modelos basados en flujos.....	27
2.2 Modelos basados en partículas.....	28
2.3 Modelos basados en agentes.....	33
<b>3. Herramientas Computacionales.....</b>	<b>39</b>
3.1 Selección de herramientas.....	39
3.2 Características revisadas.....	41
<b>4. Planteamiento del problema.....</b>	<b>43</b>
<b>5. Descripción del modelo propuesto.....</b>	<b>45</b>
5.1 Representación de la estructura.....	45
5.2 Representación de los peatones.....	46
5.3 Navegación de los peatones.....	47
5.4 Representación de resultados.....	49
5.5 Calibración y validación.....	50

5.6 Herramienta desarrollada.....	50
<b>6. Experimentación y resultados.....</b>	<b>53</b>
6.1 Caso de estudio.....	53
6.2 Evaluación de situación inicial.....	54
6.3 Cambios propuestos.....	58
6.4 Resultados obtenidos.....	59
6.5 Experiencia con la herramienta.....	61
<b>7. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>63</b>
7.1 Conclusiones.....	63
7.2 Recomendaciones.....	64
<b>Anexo A. Manual de usuario.....</b>	<b>65</b>
<b>Anexo B. Propuesta de trabajo de grado.....</b>	<b>75</b>
<b>8. Bibliografía.....</b>	<b>93</b>

## Lista de figuras

	Pág.
Figura 1.1: Casos unidireccionales básicos. Basado en Dulves et al., 2014.....	12
Figura 1.2: Casos multidireccionales básicos. Basado en Dulves et al., 2014.....	12
Figura 1.3: Formación de carriles en flujos bidireccionales. Tomado de Helbing et al., 2001.....	15
Figura 1.4: Flujo bidireccional a través de un cuello de botella en dos momentos diferentes. Tomado de Helbing et al., 2001.....	16
Figura 1.5: Franjas en dos flujos bidireccionales con diferente ángulo. Tomado de Helbing et al., 2005; Helbing & Johansson, 2013.....	17
Figura 1.6: Reducción de la distancia interpersonal en una fila que no avanza. Tomado de Helbing et al., 2001.....	18
Figura 1.7: Fotografía de larga exposición de una multitud altamente densa. Las zonas borrosas muestran las zonas con turbulencia, es decir donde las personas no controlan sus movimientos, sino que estos son determinados por las enormes fuerzas del grupo. Tomado de Johansson et al., 2008.....	19
Figura 1.8: Tiempo promedio de obstrucciones en función de la velocidad deseada en una evacuación de 200 peatones (izquierda). Formación de una obstrucción en forma de arco, Faster-is-slower producto del conflicto entre seis peatones que intentan atravesar primero (derecha). Tomado de Parisi & Dorso, 2005.....	20
Figura 1.9: Posición de un peatón con respecto al tiempo para tres tipos de flujo: Laminar o normal, <i>Stop-and-go</i> , y turbulento. Tomado de Helbing & Johansson, 2013.....	22

Figura 1.10: Gráficas de cantidad de personas evacuadas a través del tiempo. La gráfica escalonada de la izquierda permite identificar más fácilmente las obstrucciones. Tomado de Helbing et al., 2005.....22

Figura 1.11: Gráfica de presión de la multitud a través del tiempo. Tomado de Johansson et al., 2008.....23

Figura 2.1: Foto de una multitud altamente densa durante una maratón y su representación como flujo. Tomado de Zhou et al., 2010.....28

Figura 2.2: Opciones de movimiento y matriz de transición. Tomado de Burstedde et al., 2001.....30

Figura 2.3: Fases de evacuación de una habitación .Tomado de Burstedde et al., 2001.....30

Figura 2.4: Fuerza de las interacciones entre peatones con respecto a la distancia (izquierda) y al ángulo (derecha) Tomado de Helbing & Johansson, 2013.....32

Figura 2.5: Campo continuo (izquierda) y discreto (derecha) de dirección o de potencial, de una habitación con cuatro obstáculos y dos salidas, la opacidad es inversamente proporcional a la distancia a la salida. Basado en Nishinari & Kirchner, 2004.....35

Figura 2.6: Rectángulo de influencia del agente  $i$  de color amarillo, y las direcciones y ángulos del obstáculo  $k$ , el agente  $j$  y la pared  $w$  con respecto a él. Tomado de N. Pelechano et al., 2007.....36

Figura 2.7: Cálculo del espacio no disponible resultante del movimiento de los agentes A y B, a partir de sus radios y direcciones. Tomado de Chhugani et al., 2009.....36

Figura 5.1: Representación de dos baños contiguos, los muros están en negro y los obstáculos en gris. Creación propia.....45

Figura 5.2: Representación de 5 clientes sentados a un costado de una barra de cafetería y dos empleados al lado opuesto. Creación propia.....47

---

Figura 5.3: Representación de la red de navegación (en verde) generada alrededor de un muro cuadrado y un obstáculo rectangular, hacia un destino circular. Creación propia.....	48
Figura 5.4: Vista de la herramienta de simulación generada. Creación propia....	51
Figura 6.1: Plano de cafetería. Extraído de <a href="http://1.bp.blogspot.com/-j_PAhj6eAKk/UatV0uJf-bl/AAAAAAAAAU8/YdhhYa8H22g/s1600/plano+cafeteria.jpg">http://1.bp.blogspot.com/-j_PAhj6eAKk/UatV0uJf-bl/AAAAAAAAAU8/YdhhYa8H22g/s1600/plano+cafeteria.jpg</a> .....	53
Figura 6.2: Representación de la cafetería en la herramienta. Creación propia..	54
Figura 6.3: Representación de los agentes en la herramienta. Creación propia..	55
Figura 6.4: Representación de la red de navegación (en verde). Creación Propia. ....	56
Figura 6.5: Captura de la simulación, se observa que la sección izquierda de la cafetería tarda mucho más en evacuar. Creación propia.....	56
Figura 6.6: Personas Evacuadas y Factor de nerviosismo en el escenario original. Creación propia.....	57
Figura 6.7: Distribución de la distancia inicial a la salida. Creación propia.....	57
Figura 6.8: Representación de la red de navegación de la cafetería con la configuración propuesta, se observa una salida adicional sobre el muro izquierdo. Creación Propia.....	58
Figura 6.9: Comparación de la distribución de la distancia inicial. Creación propia. ....	59
Figura 6.10: Comparación de cantidad de personas evacuadas. Creación propia. ....	59
Figura 6.11: Comparación de Nivel de nerviosismo total. Creación propia.....	60





## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 3.1: Lista de herramientas de simulación, su fuente y su desarrollador o propietario.....	40
Tabla 3.2: Comparación de características de las herramientas de simulación....	41
Tabla 6.1: Comparación en velocidad de evacuación (segundos).....	60
Tabla 6.2: Actividades en la evaluación de la configuración original y su duración. .....	61



# Vocabulario

**Agentes:** La definición utilizada en este trabajo está relacionada con el verbo en inglés “agency” que implica el ejercicio de acciones, intervenciones o influencias para conseguir un propósito. En este sentido los agentes son representaciones abstractas individuales y autónomas de entidades reales (como por ejemplo peatones), que tienen la capacidad de interactuar con otros agentes y con su entorno. Las decisiones de estos agentes se basan en parámetros internos y externos, y son calculadas individualmente por cada uno de los agentes, generando así comportamientos y decisiones diferentes entre sí. Sin esta capacidad de “decidir” las representaciones de los peatones utilizadas en este estudio serían simplemente individuos o partículas, aún cuando contarán con características individuales que los diferenciaran de otros como por ejemplo tamaño, velocidad o familiaridad con el entorno. Aunque algunos autores consideran que es necesario que el agente posea cualidades adaptativas para definirse como tal, otros creen que cualquier tipo de independencia es suficiente para considerar a una entidad como agente. Basado en (Chhugani et al., 2009; Winter, 2012).

**Comportamientos emergentes:** En el estudio de la simulación por agentes se ha identificado que cuando se posee un gran número de individuos dotados con capacidades para reaccionar frente a otros por medio de reglas simples (agentes), se generan comportamientos a nivel del sistema, aun cuando estos no han sido explícitamente programados o introducidos por condiciones iniciales o límite, es decir emergen con el tiempo a partir de la interacción de sus individuos. Este fenómeno se explica por la dinámica no lineal propia de sistemas complejos y es fácilmente observable en la naturaleza, por ejemplo en grupos de animales como los cardúmenes de peces, las parvadas de aves, las estampidas, las multitudes de personas, entre otros. Basado en (Helbing, Buzna, Johansson, & Werner, 2005; Helbing & Johansson, 2013; Johansson, Helbing, Al-Abideen, & Al-Bosta, 2008; Reynolds, 1999).

**Cultura:** En el contexto de este trabajo se define como el conjunto de conocimientos, costumbres y comportamientos propios de la población de una comunidad, que definen la interacción entre sus individuos. En el caso de las interacciones de individuos en una multitud estos comportamientos se pueden observar en fenómenos como la preferencia por caminar por la izquierda o por la derecha, en la frecuencia o disposición para ceder el paso a otro peatón, la distancia que se guarda con otros individuos, la velocidad al caminar o la tolerancia ante el incremento en la densidad. Por pruebas de hipótesis se ha encontrado cuantitativamente que las diferencias en los comportamientos de poblaciones diferentes existen, sugiriendo diferencias culturales, aunque los autores sugieren que aún es necesario realizar más pruebas estadísticas. Basado en (Chattaraj, Seyfried, & Chakroborty, 2009; Johansson et al., 2008).

**Dinámica de multitudes / *Crowd Dynamics*:** El estudio del movimiento o dinámica de las multitudes busca identificar los comportamientos, variables e interacciones generadas en dichas aglomeraciones al igual que sus causas y consecuencias. La experimentación en este campo, la formulación de teorías y la generación de modelos para ponerlos a prueba ha permitido la identificación y descripción de las diferencias entre las dinámicas en estado de calma y de pánico, también se han generado indicadores para determinar el nivel de seguridad en una multitud, y se han hecho recomendaciones para el diseño y construcción de instalaciones seguras y la simulación de multitudes realistas utilizadas en la producción de contenidos para el cine, la televisión y los videojuegos. Basado en (Duives, Daamen, & Hoogendoorn, 2014; Helbing et al., 2005; Reynolds, 1999).

**Entorno:** Se refiere al conjunto de elementos y condiciones que se encuentran en la proximidad del individuo en un momento determinado e incluye la estructura física, iluminación, ruidos, otros individuos, peligros que puedan existir y las actividades o emociones propias del grupo.

**Emergencia:** Evento que representa un peligro potencial a bienes, animales y personas, que requieren la evacuación de edificios y demás estructuras para proteger su vida, salud e integridad. Pueden ser emergencias naturales como inundaciones, terremotos, huracanes; accidentes como un incendio, una fuga de gas natural, o el derrame de algún químico peligroso; o causadas deliberadamente como desorden civil, sabotaje o terrorismo.

**Estructura o Instalaciones:** Conjunto de elementos arquitectónicos como muros, edificios, elevadores, accesos, caminos, etc. y mobiliarios como mesas, sillas, lámparas, vehículos, etc. cuya presencia representa un obstáculo que impide el flujo de peatones a través de él y lo dirige a su alrededor.

**Evacuación:** Es el proceso por el cual se trasladan personas de un área donde potencialmente corren algún peligro hasta otra donde pueden estar a salvo, tan rápido y de la manera más segura posible. Si bien las evacuaciones pueden ser de grandes magnitudes como el traslado de la población de una ciudad a otra por un huracán, o pequeñas como por ejemplo vaciar un edificio de 4 plantas por un escape de gas. Las implicaciones y formas de estudio son bastante diferentes. Este trabajo se ocupa solamente de las evacuaciones locales o de menor magnitud. Basado en (Hamacher & Tjandra, 2002; Manley, 2012).

**Fuerzas Sociales / *Social forces*:** Las fuerzas sociales son definidas como vectores que describen los efectos de aceleración o desaceleración causados en peatones por interacciones sociales, en lugar de campos o interacciones físicas. Por ejemplo la atracción de un transeúnte hacia una salida, un objeto interesante o un familiar, y la repulsión frente a un peligro como el fuego o una incomodidad creciente como una aglomeración cada vez más violenta o impaciente. Basado en (Helbing & Johansson, 2013).

**Flujo de peatones:** Cuando en una multitud una gran cantidad de personas se mueve en una misma dirección con una densidad media se presenta un fenómeno similar al observado en el movimiento de fluidos, cuando la densidad es baja el comportamiento es

similar al de gases, y cuando es muy alta se asemeja al de partículas. En este sentido se puede considerar como un flujo el desplazamiento de un número de peatones en una misma dirección, con una velocidad similar y con una cohesión entre ellos lo suficientemente reducida como para identificarlos como un grupo. Basado en (Helbing & Johansson, 2013).

**Herramienta de simulación:** Para los propósitos de este trabajo, se denomina herramienta a un programa o software basado en uno o varios modelos, que permite la simulación de la dinámica de multitudes.

**Individuo:** Aun cuando en la definición de agente se exponen las diferencias entre las simulaciones con agentes y con partículas o individuos, es necesario aclarar que a lo largo del documento se utiliza la expresión individuo para referirse a los peatones, ya sea para explicar sus comportamientos o interacciones entre ellos, o para referirse a los agentes presentes en las simulaciones.

**Inteligencia colectiva:** Es uno de los comportamientos emergentes observados en las multitudes que resulta de las interacciones de sus individuos en lugar del razonamiento individual o la optimización global. (Helbing & Johansson, 2013).

**Movimiento realista:** Para que el movimiento de una multitud simulada se considere realista es necesario que presente comportamientos emergentes, al igual que respuestas a las colisiones y evasiones de las mismas entre individuos consistentes con los observados en la vida real. (N. Pelechano, Allbeck, & Badler, 2007).

**Multitud / Crowd:** En este trabajo se consideran multitudes a los grupos de personas concentradas en un espacio de manera que su densidad es suficiente para generar interacciones entre ellas como choques involuntarios o cambios en la trayectoria para evitarlos, y durante un tiempo suficiente para observar comportamientos o fenómenos emergentes como la aparición de líneas o franjas direccionales, cuellos de botella, ondas de movimiento entre otros. Basado en (Helbing & Johansson, 2013).

**Pánico:** Si bien algunos autores difieren de si existe realmente una situación en las evacuaciones que pueda denominarse como pánico, para este estudio el estado de pánico es la combinación de estados psicológicos de los peatones que derivan en una gran ansiedad o afán intenso para llegar a un destino o preservar su bienestar, en el que se toman decisiones que pueden resultar ilógicas en una situación de calma, como por ejemplo ignorar salidas de escape disponibles, muestras de violencia contra otros peatones o insistir en tomar rutas bloqueadas. Basado en (Helbing & Johansson, 2013).

**Peatón:** Seres humanos que se mueven caminando, corriendo, gateando o con ayuda de dispositivos diseñados específicamente para mitigar limitaciones motoras, como por ejemplo sillas de ruedas o muletas. En este sentido, este trabajo no tiene presente en su alcance la simulación del movimiento de personas en vehículos.

**Presión:** La presión se ha establecido como el indicador óptimo para determinar las condiciones críticas de una multitud y está definida como la densidad multiplicada por la varianza de las velocidades. (Johansson et al., 2008).

**Simulacro:** Son ejercicios que se realizan para evaluar el desempeño de los planes de emergencia, los planes de evacuación y aumentar la experiencia de los ocupantes de un edificio. Se simula la presencia de un peligro que requiera la evacuación de los ocupantes de una estructura, personas heridas, y daños a los elementos de soporte. Generalmente son planeados por los equipos de atención a emergencias y comunicados a las personas que se evacuarán con el fin de evitar lesiones o ataques de pánico por personas que crean que se trata de emergencias reales donde su vida corre peligro. Sin embargo no son capaces de reflejar los estados de pánico que se pueden presentar durante emergencias reales y es común que los participantes no los toman en serio, por lo que los resultados de tiempo y eficiencia de la evacuación pueden estar sesgados. Adicionalmente hay instalaciones en las que es logísticamente difícil o económicamente inviable realizar simulacros por ejemplo hospitales, donde se puede poner en riesgo la salud de los pacientes, o aeropuertos donde los costos son muy altos y la mayoría de las personas evacuadas no son empleados o visitantes frecuentes. Basado en (Almeida, Rosseti, & Coelho, 2013; Manley, 2012; Silva, Almeida, Pereira, Rossetti, & Coelho, 2012; Smith, 2008).

# Introducción

En las ciudades se puede encontrar una gran concentración de espacios especialmente diseñados para la satisfacción de necesidades específicas, por ejemplo colegios, universidades, aeropuertos, estaciones de metro, edificios de oficinas, torres de apartamentos, estadios, coliseos, templos, etc.. Estas estructuras además de albergar simultáneamente a una gran cantidad de personas deben proveerles seguridad no solo durante su funcionamiento cotidiano sino también durante eventos extraordinarios como desastres naturales (terremotos o inundaciones), accidentes (incendios o fallas en el suministro de agua o electricidad) y emergencias provocadas de forma deliberada. En este sentido se han llevado a cabo investigaciones científicas con el propósito de encontrar mejores materiales, técnicas de construcción, diseños de los espacios y entender el comportamiento individual y colectivo de las multitudes desde disciplinas matemáticas, sociales y psicológicas (Helbing & Johansson, 2013).

A diferencia del estudio de materiales o técnicas de construcción, el estudio de la dinámica de multitudes en evacuaciones y el correcto diseño de espacios para facilitar el flujo de peatones, especialmente en situaciones de pánico y estampidas, presentan una dificultad adicional en el sentido de que la mayoría de los experimentos necesarios para validar las teorías desarrolladas son demasiado peligrosos para llevarlos a cabo (Helbing et al., 2005), por lo que es necesario realizar experimentos en ambientes controlados, estudiar videos y testimonios de eventos reales y realizar simulaciones. Aun así se hace un llamado por parte de múltiples autores para recolectar información cuantitativa, especialmente para los eventos donde se han presentado situaciones de pánico (Helbing, Farkas, Molnár, & Vicsek, 2002; Johansson et al., 2008).

Los principales hallazgos que se han realizado tienen que ver con la clasificación de flujos de multitudes (unidireccional, bidireccional y cruzados) y la descripción de los comportamientos emergentes como formación de líneas en flujos bidireccionales, la generación de arcos al entrar en espacios estrechos, la aparición de oleadas y turbulencia en densidades altas, y la aparición de grupos formados por individuos que comparten relaciones sociales (Duives et al., 2014). También se han establecido diferentes teorías sobre el comportamiento de las multitudes en estado de pánico, principalmente en lo relacionado a factores sociales y psicológicos como la dicotomía entre actitudes solidarias y actitudes competitivas (Kirchner, Klüpfel, Nishinari, Schadschneider, & Schreckenberg, 2003), y se ha identificado la importancia de llevar a cabo estudios con poblaciones y culturas heterogéneas ya que estas variables pueden modificar parámetros de las recomendaciones realizadas sobre el diseño y construcción de edificios (Helbing et al., 2005; Helbing & Johansson, 2013).

Entre estas recomendaciones se encuentran la construcción de vías de escape exclusivas para evacuaciones, el diseño de escaleras y pasillos que tienen en cuenta el flujo de personas esperado y en consecuencia no tienen un ancho constante siendo más amplios en el extremo en el que se esperan más individuos, y no son rectos sino que están diseñados en zigzag (Helbing et al., 2005). En cuanto a los planes de emergencia se recomienda tener en cuenta a personas con movilidad limitada como por ejemplo personas de la tercera edad, personas en sillas de ruedas, o con limitaciones en su percepción, ya que las evacuaciones en las que participa gran cantidad de estas personas tardan considerablemente más tiempo (Manley, 2012). Una de estas recomendaciones tiene que ver con la creación de zonas seguras para ellos dentro de los edificios, asignar personas encargadas de guiarlas durante una evacuación o permitirles usar rutas o estructuras especiales como elevadores, y reducir la marginalización a la que frecuentemente se ven enfrentados. Finalmente, en el caso de manifestaciones o eventos que puedan ser monitoreados se recomienda hacer seguimiento en múltiples puntos tanto a la densidad local de personas como a la varianza local de velocidades ya que se ha relacionado valores altos en estas variables con la aparición de pánico y la formación de estampidas (Johansson et al., 2008).

Aún cuando se han dado grandes avances y recomendaciones en este campo, año tras año siguen ocurriendo eventos en los que el inadecuado flujo de personas, la disposición del mobiliario y elementos arquitectónicos, o la ausencia de planes de evacuación adecuados generan tragedias con múltiples heridos y fallecidos por causas diferentes al motivo inicial de la evacuación como asfixia o aplastamiento que son consecuencia del comportamiento de la multitud (Helbing et al., 2005). En este sentido el estudio de la dinámica de multitudes sigue siendo un campo vigente y relevante para la sociedad ya que un mayor entendimiento del fenómeno permitirá generar políticas que mejoren el desplazamiento de personas en peligro a lugares seguros y faciliten la respuesta de los equipos de emergencia. Simultáneamente, estos estudios han fomentado y se han beneficiado de avances en la simulación de multitudes realistas para la industria del entretenimiento, principalmente en el cine, televisión y videojuegos (N. Pelechano et al., 2007).

Actualmente existen una amplia cantidad de programas que permiten estimar el flujo de personas, los riesgos y generar recomendaciones de seguridad, principalmente en la fase de diseño de los edificios (Zhou et al., 2010), sin embargo su costo y complejidad pueden representar una limitación para personas sin recursos o conocimientos suficientes que desean evaluar problemas potenciales en evacuaciones de pequeños o medianos edificios, En este sentido el propósito de este trabajo es la generación de un entorno capaz de simular evacuaciones de personas en múltiples estructuras, que permita evaluar posibles alternativas para ser comprobadas, validadas y ajustadas posteriormente en simulacros.

Para lograr este objetivo se realizó una revisión de la literatura en la que se buscaba conocer tres aspectos principales: los parámetros y variables que inciden en la dinámica de multitudes durante evacuaciones, los acercamientos académicos al problema (modelos) y las herramientas que se han derivado de dichas investigaciones. A continuación se realizó la definición del problema y se evaluaron las ventajas y desventajas de los modelos, encontrando que el más idóneo para cumplir los objetivos



del proyecto es Social Forces debido a su enfoque microscópico, uso de espacio continuo y la posibilidad de incluir poblaciones heterogéneas (Duives et al., 2014; Helbing et al., 2005, 2002; N. Pelechano et al., 2007).

Como resultado de este estudio, se ha desarrollado un entorno o herramienta de simulación que permite al usuario cargar una imagen de referencia del plano de la estructura que se desea estudiar, a partir de la cual el usuario creará los elementos arquitectónicos, poblaciones y salidas con los que se simulará la evacuación y pondrá a prueba diferentes soluciones. A partir de los muros, mobiliario y salidas del escenario se crea una red de nodos que representan las ubicaciones en que los agentes que navegan la estructura tienen que dar un giro para evadir algún obstáculo, por ejemplo las esquinas de los muros. Con esta red y la información de familiaridad del agente con la estructura, su entrenamiento ante situaciones de emergencia, se calcula la ruta global (secuencia de nodos) que utilizará para evacuar la estructura. Sin embargo, para navegar entre los nodos, cada agente tendrá en cuenta la posición de los agentes próximos, su propio estado de pánico, y el tiempo que consideró suficiente para llegar al destino.

Los resultados de la simulación se presentan de dos maneras, en primer lugar los agentes se mueven a través de la estructura simulada en tiempo real y se exportan archivos planos de extensión .csv con información del proceso de evacuación propia de cada agente a intervalos definidos por el usuario, como las características iniciales, su posición, su velocidad, su nerviosismo, entre otras.

Es necesario mencionar algunas limitaciones del entorno de simulación desarrollado en este trabajo, en primer lugar la herramienta está diseñada para simular únicamente los flujos que se presentan en evacuaciones con puntos de encuentro definidos, es decir que no es adecuada para simular flujos cotidianos como por ejemplo el ir y venir de peatones en una feria. En segundo lugar, la herramienta no permite la simulación de edificios de múltiples plantas de forma simultánea, por lo que en dichos casos es necesario simularlas una a una. Por último, en las simulaciones no se tiene en cuenta el comportamiento de peligros específicos como la propagación del fuego o del humo en un incendio frente a los cuales los agentes deban reaccionar.

La herramienta y su manual de usuario pueden ser descargados desde la direcciones web:

- [https://github.com/mecamargob/MEC\\_EvacuationSimulator](https://github.com/mecamargob/MEC_EvacuationSimulator)
- [https://drive.google.com/drive/folders/1cNK7UAiG\\_-Zpd5p2UlnDhsZeb\\_Zjy21O](https://drive.google.com/drive/folders/1cNK7UAiG_-Zpd5p2UlnDhsZeb_Zjy21O)

, y se ha probado en equipos con múltiples versiones del sistema operativo Windows con procesadores intel y AMD, simulando la evacuación de una cafetería de una planta y 36 peatones. Los parámetros del entorno de simulación han sido calibrados a partir de las observaciones realizadas en el edificio 401 de Ingeniería de la Sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia. Sin embargo es muy recomendable tener en cuenta investigaciones realizadas para las poblaciones objetivo de cada simulación, tanto en lo relacionado con la demografía como con la localización geográfica puesto que se han encontrado límites a la generalización de resultados ya que factores como diferencias culturales y la composición de las multitudes con respecto a la edad, el género y las motivaciones pueden ser de gran importancia (Helbing et al., 2005).

El documento se encuentra organizado de acuerdo a la metodología utilizada, se empieza con una revisión del estado del arte en dinámica de multitudes con un enfoque en el fenómeno de las evacuaciones de peatones donde se exponen los diferentes hallazgos a nivel físico, psicológico y social, también en este capítulo se mencionan algunas medidas de desempeño y recomendaciones a los planes de emergencia y construcción de edificaciones que se desprenden de los resultados de las investigaciones. En el segundo capítulo se desarrolla una comparación de las principales características de los modelos o abstracciones que son más relevantes para el desarrollo de este trabajo. Posteriormente, en el tercer capítulo se describen las principales herramientas (programas de software) desarrolladas para la simulación de evacuación de peatones, y con base en ellas se enumeran las características principales que se desea incluir en el entorno de simulación generado en este trabajo. A continuación, en el cuarto capítulo se hace una descripción formal del problema, los actores, variables y parámetros que intervienen y la formulación de la pregunta de investigación que se busca resolver. En el quinto capítulo se explica el modelo de simulación propuesto en este trabajo, los supuestos y simplificaciones realizadas frente a la definición del problema, y la forma en que funciona y debe utilizarse la herramienta que implementa dicho modelo. El caso de estudio y los resultados del uso de la herramienta se presentan en el sexto capítulo para finalmente llegar a las conclusiones y recomendaciones en el séptimo. Adicionalmente se tiene una sección para los anexos donde se muestran el manual de usuario, la licencia de uso del programa desarrollado, y se culmina el documento con una sección final de bibliografía.

# Objetivos

## Objetivo general:

Desarrollar una herramienta de simulación basada en agentes para la evacuación de edificios e instalaciones, que pueda ser utilizado por usuarios con recursos económicos, académicos y/o tecnológicos limitados para identificar oportunidades de mejora o puntos críticos en los planes de atención a emergencias, principalmente en las rutas de evacuación de personas.

## Objetivos específicos:

- Diseñar un modelo basado en agentes que permita simular la evacuación de personas teniendo en cuenta la diversidad en atributos como movilidad, posición, edad, nerviosismo, entre otros recomendados por la literatura.
- Desarrollar un entorno que permita aplicar el modelo diseñado en el punto anterior en diferentes estructuras (edificios e instalaciones) para identificar oportunidades de mejora o puntos críticos en los planes de atención a emergencias, principalmente en las rutas de evacuación de personas.
- Generar la documentación pertinente para que el entorno desarrollado en el punto anterior pueda ser utilizada por personas con recursos económicos, académicos y/o tecnológicos limitados.



# 1. Dinámica de multitudes

Las multitudes o aglomeraciones de personas se presentan cuando una gran cantidad de personas se encuentra en un mismo lugar y momento, y los movimientos de sus individuos dependen principalmente de interacciones locales por un periodo de tiempo prolongado (Duives et al., 2014). En este sentido la duración, frecuencia, tamaño y causas de las aglomeraciones pueden llegar a ser tan variadas como las actividades humanas. Por ejemplo aglomeraciones cotidianas derivadas de los horarios de trabajo y estudio, y del ordenamiento urbanístico de cada ciudad se pueden transformar en congestiones en los sistemas de transporte masivo, y concentraciones de personas en los centros financieros donde se encuentran la mayoría de edificios de oficinas, las zonas comerciales o plazas de comida y finalmente las zonas residenciales. También pueden presentarse aglomeraciones programadas en forma de eventos de gran interés como conciertos, encuentros deportivos, manifestaciones o festivales. Generalmente estas dos categorías de aglomeraciones tienen lugar en espacios construidos o adecuados para la cantidad de personas y los flujos que se puedan presentar, y cuentan con planes para la prevención de emergencias, sin embargo no es así con las aglomeraciones espontáneas, que se generan como respuesta a eventos repentinos con la capacidad de despertar reacciones emocionales intensas sobre una gran cantidad de personas, como por ejemplo la presencia inesperada de celebridades, acontecimientos políticos o sociales de gran impacto como la firma de un tratado de paz o la muerte de alguna persona muy apreciada o reconocida por la población general. Este tipo de multitudes se presentan generalmente en lugares al aire libre y no son muy frecuentes por lo que las autoridades las manejan de manera reactiva, a diferencia de las dos primeras categorías que son gestionadas de manera preventiva.

Aun cuando se cuenta con estructuras diseñadas para admitir grandes aglomeraciones de personas, planes de emergencia y personal de apoyo y logística, se siguen presentando tragedias alrededor del mundo en las que personas mueren o salen heridas como consecuencia de asfixia o aplastamiento durante momentos de pánico (Helbing et al., 2005). Uno de los ejemplos más claros son los accidentes en la ciudad de Meca en Arabia Saudita con ocasión del Hajj, que es la peregrinación que deben hacer al menos una vez en la vida los musulmanes que cuenten con la salud y los recursos económicos para ello. Esta peregrinación se desarrolla dentro de 5 días específicos cada año. En este evento los asistentes en general asumen un estado de ánimo calmado y su velocidad de desplazamiento es baja, sin embargo la gran cantidad de asistentes y la preocupación propia de los últimos días sobre no cumplir con los rituales a tiempo han causado estampidas fatales a pesar de la planificación y los esfuerzos del gobierno saudí. En lo corrido de este siglo se presentaron accidentes en los años 2001, 2003, 2004, 2005, 2006 y 2015, siendo los dos últimos eventos los más trágicos hasta el

momento, con 364 muertes en el 2006 y según cifras de AP más de 2400 en el 2015, aunque el gobierno saudí ha estimado la cifra de fallecidos de ese año en 769 (Gladstone, 2015).

Las tragedias como consecuencia de pánico en multitudes ocurren en situaciones variadas, por ejemplo en grandes espacios abiertos como estadios de fútbol, espacios cerrados como discotecas, o lugares públicos demasiado concurridos como puentes (Helbing et al., 2005, 2002; Helbing & Johansson, 2013). Para reducir la magnitud y frecuencia de este tipo de accidentes es crucial entender la forma en que los individuos se mueven, piensan y actúan dentro de una multitud, y los comportamientos grupales emergentes que se desprenden de dichas acciones individuales, ese es el objetivo del estudio de la dinámica de multitudes (*Crowd Dynamics*). Para ello los investigadores han utilizado una variedad de enfoques, por ejemplo, se han dedicado al estudio de fenómenos similares dentro de la naturaleza como cardúmenes de peces, parvadas de aves, migraciones de animales o quimiotaxis de bacterias; se han realizado experimentos con hormigas y ratones, se han formulado teorías derivadas de la dinámica de fluidos y gases, de la teoría de juegos, se han planteado modelos de redes, modelos basados en agentes, y más recientemente se han generado trabajos basados en inteligencia artificial (Hajibabai, Delavar, Malek, & Frank, 2007; Zheng, Zhong, & Liu, 2009).

El diseño y perfeccionamiento de los planes de emergencia comprende actividades como el entrenamiento de los equipos de respuesta (bomberos, paramédicos, rescatistas), el aprovisionamiento de recursos y monitoreo constante de posibles peligros entre otras, y abarcan fases previas a las emergencias, durante estas y una vez que han concluido. La investigación y mejor entendimiento de la dinámica de multitudes permitirá apoyar estas actividades al establecer ubicaciones y dimensiones apropiadas para los nuevos edificios, la disposición de caminos, entradas, salidas, escaleras, elevadores, etc., la forma de las habitaciones y corredores, al igual que sus usos y horarios de funcionamiento. También al desarrollar modelos y herramientas de simulación cada vez más sofisticadas y ajustadas al fenómeno real, se reducirán los costos asociados a la programación y ejecución de simulacros, se podrán evaluar más rutas, más escenarios y prever potenciales peligros. Aún así los simulacros seguirán siendo necesarios para validar los resultados de las simulaciones y brindar entrenamiento a los ocupantes de los edificios (Helbing et al., 2005, 2002; Smith, 2008).

## 1.1 El individuo, el grupo y su entorno

El movimiento de peatones en una multitud es el resultado emergente del movimiento de cada uno de sus individuos, las interacciones entre ellos y los cambios que pueden darse sobre el entorno físico que ocupan. Depende de múltiples factores que pueden ser categorizados entre físicos, psicológicos y sociales (Zhou et al., 2010).

En el grupo de los factores físicos se encuentran aquellas características externas y tangibles que definen la capacidad del individuo de moverse y el la velocidad a la que lo puede hacer, como por ejemplo su posición, dirección y velocidad en un momento dado, su velocidad promedio, velocidad máxima, masa, altura, integridad (por ejemplo si está

ilesos, heridos) (Almeida et al., 2013), o si posee alguna condición que limite su movilidad, percepción del entorno o capacidad de análisis (Manley, 2012). Los factores físicos son utilizados como insumos básicos para la toma de decisiones en la mayoría de los modelos de simulación.

Los peatones planean la ruta que deben usar porque los entornos físicos en los que se encuentran tienen muros, muebles, escaleras, elevadores, puertas, etc que actúan como obstáculos entre su punto de inicio y de destino. En este sentido son relevantes factores psicológicos del individuo como el estado emocional, su familiaridad con la estructura, y en casos de emergencia, su nivel de pánico o nerviosismo y su experiencia en situaciones similares. También son relevantes algunas características del entorno que pueden afectar su percepción o navegación, por ejemplo la iluminación, el ruido, la existencia de puertas o pasillos bloqueados, o de peligros como incendios, fugas de gas, etc. Por último, si bien los factores psicológicos tienen un papel importante en la toma de decisiones, no hay un consenso sobre como estos influyen exactamente el comportamiento humano (Zhou et al., 2010).

El movimiento de un individuo es diferente si se encuentra solo o dentro de un grupo puesto que los otros peatones actúan como obstáculos móviles, pero también se relacionan con él brindándole información (que puede ser verdadera o no), apoyo, indiferencia, agresiones y estímulos emocionales. Las interacciones entre los individuos dependen de los factores de tipo social, que se refieren a la cultura, costumbres y los vínculos entre los individuos del grupo, es decir familiares, de amistad, jerarquía, etc. Las decisiones influenciadas principalmente por relaciones sociales de los individuos tienen la capacidad de modificar otros de sus factores, por ejemplo la velocidad de movimiento de una madre con su hijo durante una evacuación es diferente al de la misma mujer si estuviera sola (Smith, 2008), o la forma en que se prefiere resolver conflictos es en general más cordial cuando se trata con personas con las que hay familiaridad, frente a actitudes agresivas o asertivas cuando se trata de desconocidos (Gwynne, Galea, Owen, Lawrence, & Filippidis, 2005). Los factores sociales han sido utilizados extensamente en los modelos de los últimos años para demostrar los comportamientos emergentes en las multitudes (Zhou et al., 2010).

Entre esta gran cantidad de factores sobresalen por su impacto sobre el comportamiento de la multitud durante emergencias: la demografía de los individuos, la familiaridad con la estructura, el pánico o nerviosismo y las fallas en la comunicación entre los individuos o percepción parcial de estos sobre la situación.

En un estudio de la tragedia sucedida en Arabia Saudita en el año 2006 con ocasión del Hajj se encontraron densidades mayores y velocidades promedio menores que las reportadas en muchas otras publicaciones anteriores. La razón de estas discrepancias es que los estudios anteriores se habían enfocado en poblaciones específicas, por ejemplo individuos de países Europeos o Norteamericanos, que poseen en promedio cuerpos más grandes que individuos de países Asiáticos. La distribución de variables principalmente demográficas como el tamaño del cuerpo de los peatones estudiados tiene entonces una influencia dramática sobre la relación entre velocidad y densidad (Johansson et al., 2008).

La familiaridad del individuo con la estructura que ocupa se refiere a su conocimiento y entendimiento de la misma. Depende principalmente de sus experiencias en dicho espacio y de factores externos como la señalización, otros individuos y el personal de gestión de emergencias. Mientras que las experiencias sobre la estructura pueden tener un impacto adverso en situaciones de emergencia, en el sentido de que el individuo preferirá las rutas cotidianas que considera más confiables frente a las rutas de emergencia que generalmente no usa, las fuentes externas de información depende enormemente de la percepción que tienen los individuos sobre su confiabilidad (Gwynne, Galea, Lawrence, & Filippidis, 2001). Por ejemplo, el impacto de la señalización tradicional (planos, diagramas y señales de rutas de emergencia) se ve reducido con el tiempo, pues la gente se acostumbra a ver estas indicaciones y a filtrar dicha información, por lo que durante una emergencia es improbable que las personas estén preparadas para tomar una ruta que no han usado antes (Smith, 2008). También la gente sigue a aquellas personas que perciben como conocedoras de la mejor ruta, o la ruta más familiar lo que puede generar congestiones y altas densidades y presiones en unas pocas salidas mientras que otras son utilizadas por debajo de su capacidad (Helbing et al., 2005). En este sentido se ha entendido la necesidad de invertir en el entrenamiento de personal de gestión de emergencias, simulacros de evacuaciones y señalización que incluya luz y sonido para brindar información a los ocupantes sobre las rutas de salida adecuadas de acuerdo a su posición (Shields & Boyce, 2000).

Santos y Aguirre mencionan tres principales paradigmas que se han establecido sobre el pánico desde la última mitad del siglo pasado. La primera de ellas indicaba que durante emergencias extremas o fatales las personas perdían su humanidad y se convertían en animales abrumados por el miedo. En los años 50 y 60 se presentaba el pánico como un comportamiento colectivo asocial en el que las personas no se convertían en animales, pero si atendían sus propias necesidades en lugar de preocuparse por la suerte de los otros. Finalmente a partir de 1980 el paradigma indica que las personas no sufren de pánico, no se vuelven animales, ni abandonan sus lazos con otros, sino que continúan siendo actores sociales que hacen parte de organizaciones sociales, que continúan preocupándose profundamente por los otros al nivel que frecuentemente ponen en peligro sus propias vidas por amigos, desconocidos o pertenencias valiosas (Johnson, 2012; Santos & Aguirre, 2004).

A pesar de que puedan seguir siendo actores sociales preocupados por otros, durante las emergencias es común que los individuos sin entrenamiento se enfrenten a situaciones de alto estrés, presión y ansiedad en las que no sean capaces de orientarse y tomar las decisiones correctas (N. Pelechano & Malkawi, 2007). En este sentido, algunos autores continúan llamando este comportamiento como irracional, no por que se pierda la humanidad de los individuos o su preocupación por los otros, sino porque los efectos de estos comportamientos reduce las probabilidades de sobrevivir en comparación al comportamiento que se observaría durante una situación normal, especialmente cuando las razones para el pánico pueden no ser reales como el fuego u otra amenaza, sino percibidas, o causadas por comportamientos producto de la ansiedad. A este tipo de emergencias se les conoce como pánicos fantasma (Phantom panics en inglés) (Helbing et al., 2002).



Se ha identificado que en muchos casos diferentes conductas ocurren de manera simultánea durante una evacuación, por ejemplo peatones pueden estar evacuando un edificio por una salida mientras que por otra hay un grupo de personas considerando entrar para ayudar a otros. Esto ocurre porque en una multitud pueden existir muchos grupos de personas en múltiples ubicaciones con percepciones completamente diferentes de la situación (Santos & Aguirre, 2004), y con su comportamiento contribuir inconscientemente a eventuales tragedias. Esta situación se observó en el concierto de "The Who" del 3 de diciembre de 1979 en Cincinnati, Ohio, en el cual se produjo una gran aglomeración, generando una gran presión sobre las personas más cercanas a la entrada, de manera que no podían controlar sus movimientos y generando la caída de varias personas. En este momento la policía describía la multitud como normal para un evento de ese tipo, sin embargo al abrir las puertas 25 personas cayeron al suelo, de las cuales murieron 11. Las personas que esperaban entrar al concierto pero que se encontraban más atrás no estaban enteradas de lo que sucedía cerca a las entradas, lo que contribuyó a la desafortunada situación en la que el grupo de frente que intentaba evitar ser aplastado se encontró enfrentado con el grupo que intentaba entrar al edificio (Johnson, 2012).

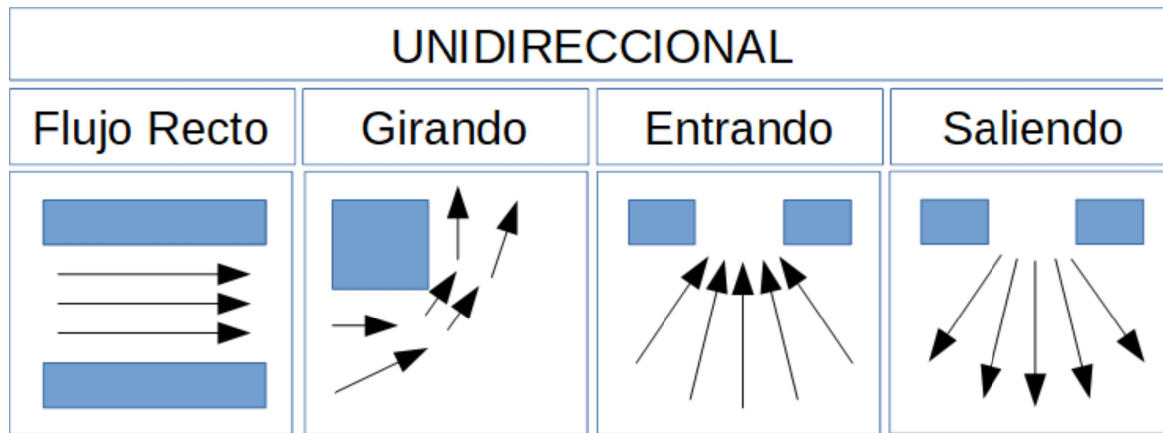
## 1.2 Casos básicos de movimiento

La taxonomía del movimiento de multitudes define 8 casos básicos que combinados cubren la totalidad de sus posibilidades (Duives et al., 2014). Estos casos fueron escogidos por Duives de modo que solo uno de ellos se puede presentar a la vez y son el producto de evaluar las combinaciones de un flujo unidireccional frente a varios flujos multidireccionales, con o sin intersecciones y las relaciones de estos con la geometría del entorno.

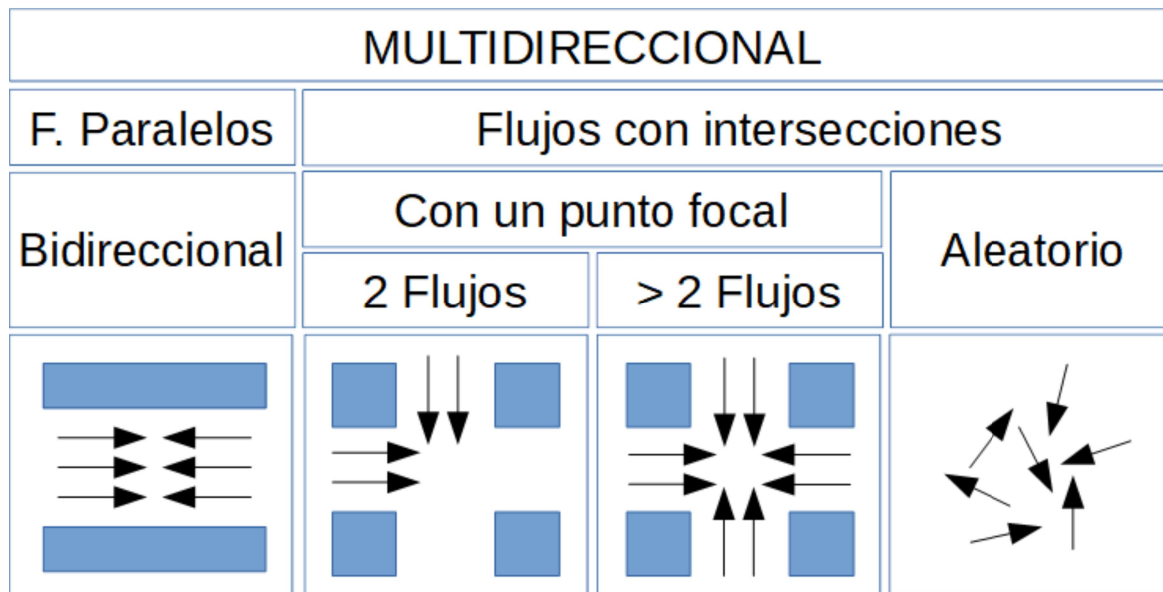
Es importante precisar que aunque se habla de flujos unidireccionales, los individuos de estos no tienen exactamente la misma dirección en un momento dado, esto considerando que se trata de actores heterogéneos comportándose de manera racional y de acuerdo a las normas, y no de un enjambre de robots (Santos & Aguirre, 2004). Esta situación es más evidente en situaciones de pánico, en las que algunos individuos regresan al lugar que están evacuando por ejemplo por un gol de último minuto (Helbing et al., 2005), recuperar posesiones importantes (D'Orazio, Longhi, Olivetti, & Bernardini, 2015) o ayudar a otros (Johnson, 2012).

En los casos base unidireccionales se tiene el flujo recto de peatones sin cambios en su dirección, el cambio de dirección que se da al girar en una esquina, el paso de un espacio ancho a uno más angosto y viceversa. El detalle de estos casos se puede observar en la Figura 1.

Por otro lado en los casos base multidireccionales se tiene un flujo paralelo bidireccional sin intersecciones como por ejemplo una escalera donde un grupo intenta subir y el otro bajar, un flujo bidireccional donde existen intersecciones entre dos flujos, otro con más de dos flujos, y finalmente otro en el que cada individuo tiene una dirección particular, por lo que puede asumirse que son aleatorias. El detalle de estos casos se puede observar en la Figura 2.



**Figura 1.1:** Casos unidireccionales básicos. Basado en Dulves et al., 2014



**Figura 1.2:** Casos multidireccionales básicos. Basado en Dulves et al., 2014

### 1.3 Comportamientos emergentes

El movimiento de los individuos en un grupo genera interacciones físicas y sociales entre ellos, que se ven reflejados en cambios en su velocidad y dirección, pero también en su estado mental y emocional. Estos patrones complejos son producto de una organización intrínseca del sistema, es decir que no son planeados, prescritos u organizados externamente, por ejemplo por señales de tránsito, leyes o convenciones sociales, y

demuestran que una dinámica colectiva inteligente y eficiente puede basarse en interacciones locales simples (Helbing et al., 2005; Helbing & Johansson, 2013).

Al estudiar estas interacciones se pueden identificar comportamientos atribuibles al sistema y no a decisiones o coordinación entre los individuos, como formación de ondas, líneas, propagación de información, emociones, etc., se ha identificado también que algunos de estos comportamientos están relacionados con accidentes por lo que es necesario el entendimiento de por qué, dónde y cuándo podrían potencialmente ocurrir (Helbing & Johansson, 2013).

En forma paralela a la presencia de los comportamientos emergentes, Pan (2017) describe los comportamientos disruptivos o no adaptativos como aquellas acciones destructivas o violentas que pueden presentarse en situaciones de emergencia, como empujones, golpes, estampidas o pasar sobre otros y que son responsables por la muerte y lesión de la mayoría de las víctimas en los desastres relacionados con multitudes (Almeida et al., 2013). Se indica que estos comportamientos son consecuencia de las decisiones tomadas por individuos en estado de alto estrés, al enfrentarse a situaciones que perciben como muy importantes, muy urgentes y muy inciertas (Pan, Han, Dauber, & Law, 2007), sin embargo a continuación se presenta una descripción de los comportamientos emergentes, las condiciones en que ocurren, y como están relacionados con los comportamientos disruptivos, esta descripción está basada ampliamente en el trabajo de Helbing (Helbing et al., 2005, 2002).

### 1.3.1 Formación de grupos

Individuos en estado de reposo que no están relacionados entre sí, como por ejemplo, esperando en una plataforma por un tren o descansando en la playa, se distribuyen uniformemente por el área disponible (Olfati-Saber, 2006), sin embargo esta situación casi nunca se presenta ya que generalmente existen relaciones entre los peatones o puntos de interés como accesos a otras áreas, pinturas, vitrinas, entre otros. La densidad de peatones aumenta al rededor de estos lugares particularmente atractivos, reduciendo la distancia interpersonal entre ellos, formando patrones de círculos o semicírculos (Helbing et al., 2002; Santos & Aguirre, 2004).

Cuando individuos relacionados se mueven en grupo a baja velocidad lo hacen caminando lado a lado, formando filas perpendiculares a la dirección de movimiento. Por otro lado, cuando la velocidad de movimiento, o la densidad de la multitud en la que se mueven aumenta, el grupo toma forma de letra V, de modo que existe un balance entre la comunicación e interacción entre sus miembros y la facilidad para atravesar obstáculos permaneciendo unidos, sin embargo este comportamiento reduce la velocidad de movimiento de la multitud (Moussaïd, Perozo, Garnier, Helbing, & Theraulaz, 2010).

Los grupos compuestos por peatones relacionados como familiares, amigos, turistas, etc. no necesitan líderes y pueden constituirse desde dos individuos (parejas). No solo se mueven con un destino, velocidad y dirección común, sino que también suelen tener en cuenta las opiniones y deseos de sus miembros para tomar decisiones, cuidándose entre sí, y llegando a acuerdos sobre las acciones a tomar. Estas interacciones adicionales

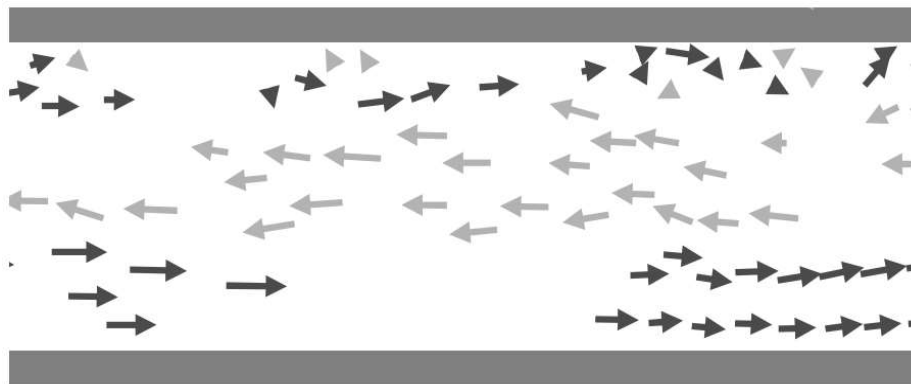
explican que los individuos solitarios se decidan más rápido que aquellos que lo hacen como parte de un grupo, quienes en situaciones de emergencia, suelen presentar incluso dinámicas de retroceso o contra-flujo con respecto a la multitud en la que se mueven (Zheng et al., 2009).

### 1.3.2 Formación de carriles

De acuerdo a Helbing (Helbing et al., 2005, 2002) cuando dos flujos paralelos con direcciones opuestas se encuentran, los individuos que se encuentran adelante intentan abrirse paso a través del grupo frente a ellos, lo que genera conflictos que generalmente son solucionados cuando los dos individuos enfrentados escogen desviarse del mismo modo o hacia el mismo lado, esta preferencia se llama fenómeno de rompimiento de simetría (ya que ambos lados son en principio equivalentes) y varía dependiendo de la región, ya que la gente aprende a usar la estrategia de la mayoría, que puede ser desbalanceada por alguna razón o simplemente aleatoria.

Una vez se han solucionado los conflictos de los primeros individuos del grupo, los que están inmediatamente atrás encuentran más sencillo seguir a estos que abrirse paso ellos mismos, reduciendo el número de encuentros con peatones que se mueven en la dirección opuesta, incrementando la eficiencia del flujo de peatones (Helbing, Molnár, Farkas, & Bolay, 2001). Por lo que se forman pequeños canales que se alargan y finalmente se unen produciendo canales o carriles mas gruesos cuyo número depende del ancho y la longitud del espacio, los flujos de entrada y salida, las fluctuaciones y las perturbaciones.

Es importante aclarar que este fenómeno es propio de las situaciones de calma, puesto que en estado de pánico los individuos intentarán sobrepasar a los otros peatones que se mueven en la misma dirección, encontrándose con las personas que se dirigen en sentido opuesto y creando de esta manera obstrucciones que aumentarán la cantidad de conflictos y maniobras necesarias para solucionarlos.

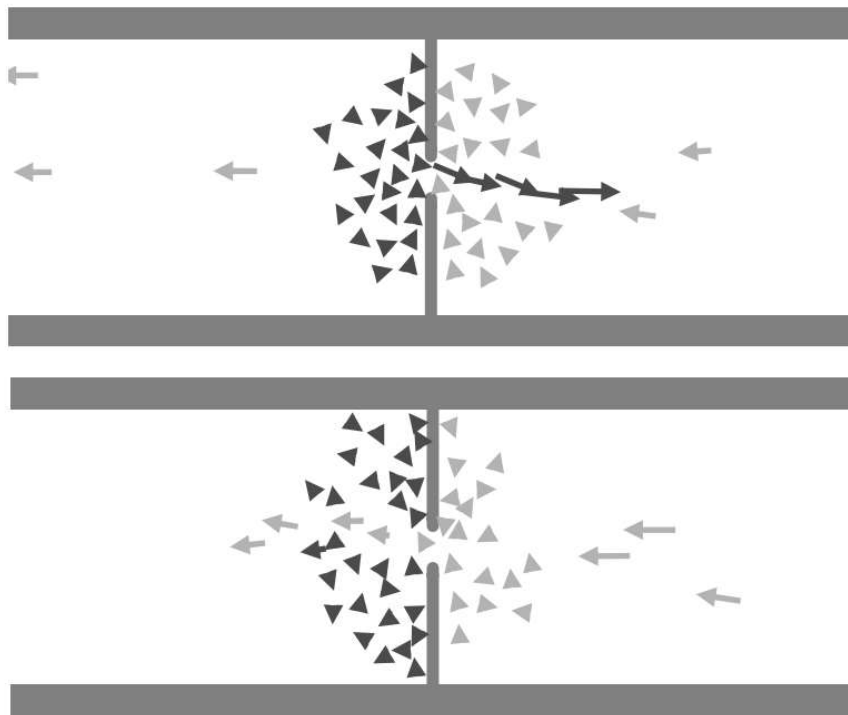


**Figura 1.3:** Formación de carriles en flujos bidireccionales. Tomado de Helbing et al., 2001.

### 1.3.3 Oscilación en cuellos de botella

Al igual que la generación de carriles, Helbing (Helbing et al., 2005, 2002) indica que la oscilación en cuellos de botella se produce en situaciones de calma, cuando flujos paralelos bidireccionales entran en contacto, pero a diferencia de la generación de carriles, este fenómeno requiere que el encuentro entre los dos flujos se dé en un cuello de botella propio del entorno, como por ejemplo una puerta.

Dado que se trata de un cuello de botella no es posible que lo atraviesen simultáneamente individuos con direcciones opuestas por lo que no se pueden formar filas o canales. En su lugar, la dirección de los individuos que utilizan el cuello de botella se alterna cada cierto tiempo. Dicha oscilación se produce por las diferencias en presión de los dos grupos, mientras los individuos de un grupo están utilizando el acceso, su ansiedad es menor puesto que pueden avanzar, lo que permite exista cada vez mas distancia entre el individuo que atraviesa el cuello de botella y el que lo sigue. Al mismo tiempo los individuos que se dirigen en el otro sentido sienten cada vez mas ansiedad por no poder pasar por lo que la presión sobre los que están mas adelante va en aumento, finalmente llega un momento en que la distancia entre los individuos que usan el acceso es suficiente para que uno de los individuos del otro grupo lo interrumpa, pase, y permita que los que están detrás de él lo sigan hasta que la misma situación ocurra para el otro grupo.

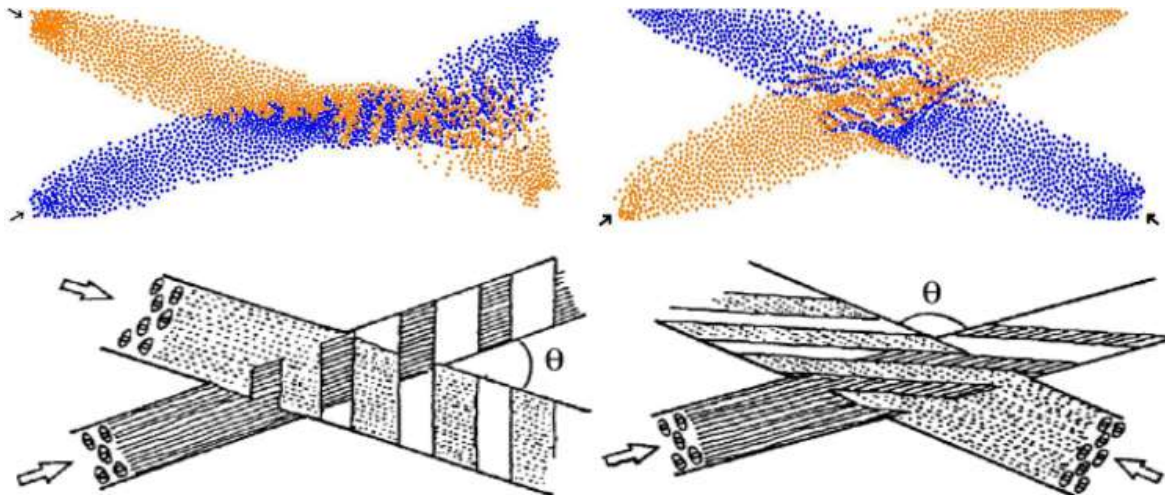


**Figura 1.4:** Flujo bidireccional a través de un cuello de botella en dos momentos diferentes. Tomado de Helbing et al., 2001.

### 1.3.4 Formación de franjas

A partir de la investigación de Ando, Oto y Aoki de 1998, Helbing menciona que la formación de franjas o efecto de cremallera (zipper effect en inglés) ocurre cuando dos flujos o más los suficientemente anchos se interceptan. De la misma manera que con la formación de carriles, la formación de franjas es un fenómeno de segregación, pero no es estacionario sino que las franjas son ondas de densidad moviendo en la dirección de la suma de los vectores direccionales de ambos flujos. De hecho, la formación de carriles puede considerarse como un caso particular de formación de franjas, en el que las direcciones son exactamente opuestas, en el que no ocurre una intersección y las franjas no se mueven de forma sistemática.

Las observaciones indican también que este fenómeno es comparable con el de oscilación en cuellos de botella, en el sentido de que las franjas se crean en una dirección cuando la densidad de su grupo es ligeramente superior a la que presenta el grupo que se dirige en la otra dirección, permitiendo que otros individuos ubicados detrás y al costado de los primeros los sigan hasta que la densidad del otro grupo cree su propia franja (Helbing et al., 2005).



**Figura 1.5:** Franjas en dos flujos bidireccionales con diferente ángulo. Tomado de Helbing et al., 2005; Helbing & Johansson, 2013.

Adicionalmente menciona que cuando se presentan cuatro flujos no se observan patrones estables, sino de muy corta duración y se destruyen entre sí, produciendo una situación aparentemente caótica, como por ejemplo:

- Flujos que rotan en el sentido de las manecillas del reloj o en el sentido contrario.
- Flujos dominantes en direcciones opuestas con flujos en espera en las direcciones perpendiculares.
- Franjas de corta duración en una de las 4 direcciones diagonales posibles.

### 1.3.5 Enajenación o conformismo

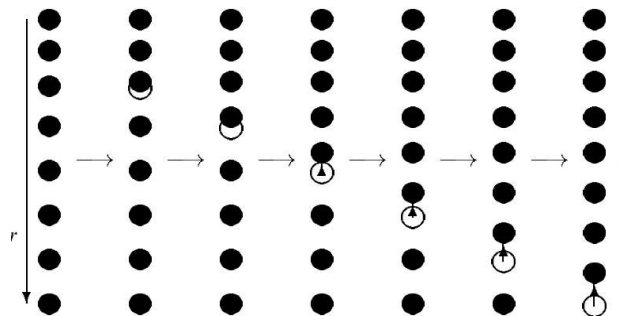
Este comportamiento conocido como *“herding”* o *“flocking”* en inglés, se presenta en individuos en estado de pánico, con poco conocimiento del entorno o en situaciones de poca visibilidad. El fenómeno consiste en la transición de la psicología individual a la psicología del grupo, no necesariamente a la de los líderes como sugieren las denominaciones en inglés, en la que los individuos prefieren transferir el control de sus acciones a otros en lugar de tomar sus propias decisiones, llevándolos al conformismo, imitándolos con la esperanza de que estos sepan lo que hacen. Las personas que presentan este comportamiento pueden ignorar alternativas que conocen y no se están usando, al preferir usar la misma que los otros, llevando a mayores tiempos de evacuación y congestiones en pocas puertas (Helbing et al., 2005).

### 1.3.6 Formación de ondas

El fenómeno de formación de ondas (*“Stop-and-go motion”* o *“Stop-and-go waves”* en inglés), se presenta en multitudes de flujo unidireccional, y son flujos longitudinales interrumpidos temporalmente que dependen de dos comportamientos básicos de los individuos: el primero de ellos tiene que ver con el respeto de las filas en situaciones normales (sin pánico), en donde los peatones esperan que las personas que están adelante avancen y se cree un espacio entre ellos antes de moverse también, este comportamiento está relacionado con los tiempos de adaptación o reacción que requieren los peatones para ajustar su velocidad y aceleración (Duives et al., 2014).

El segundo comportamiento es que la distancia interpersonal mínima con la que los peatones se sienten cómodos es inversamente proporcional a su ansiedad, en otras palabras una persona en estado de pánico no respetará estas distancias y entrará en contacto con los peatones delante de ella (N. Pelechano et al., 2007).

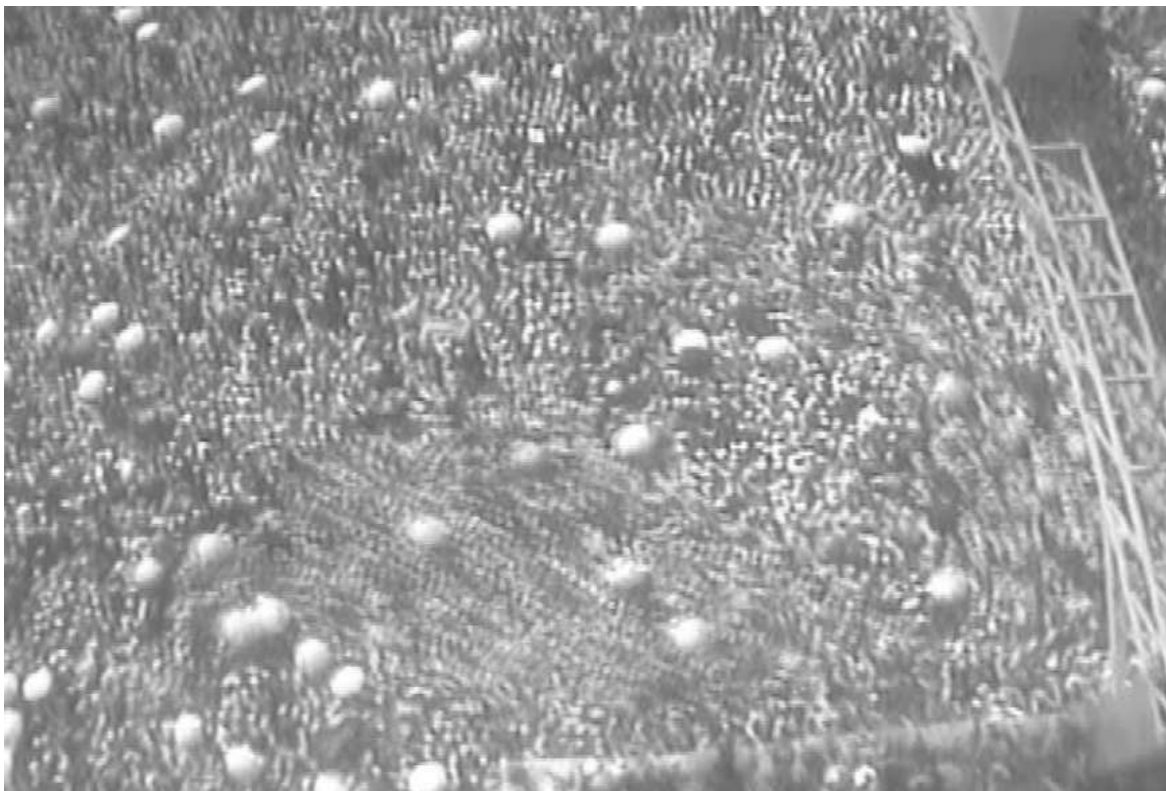
De esta manera, aun cuando las personas al frente de un grupo no estén avanzando, se puede observar que las personas que se encuentran atrás si lo hacen, pues los individuos en medio avanzan conforme se reduce la distancia interpersonal con la que se sienten cómodos, generando la ilusión de que el grupo se mueve, aumentando así su densidad desde la parte de adelante hacia atrás.



**Figura 1.6:** Reducción de la distancia interpersonal en una fila que no avanza. Tomado de Helbing et al., 2001.

### 1.3.7 Turbulencia

Cuando el fenómeno de formación de ondas no es controlado y la ansiedad o pánico entre los peatones aumenta se presenta el fenómeno de turbulencia que se refiere principalmente a un estado en que la densidad en una zona de la multitud es tan alta que los individuos no son capaces de decidir, controlar, ni coordinar sus movimientos. A continuación se presentan ondas de choque, generadas por las interacciones físicas de los individuos, que en situaciones extremas puede propulsarlos distancias de hasta 3 metros, lo que genera accidentes como caídas, asfixia o aplastamiento (Johansson et al., 2008). Del mismo modo, la multitudes bloqueadas pueden presentar presiones capaces de doblar barreras de acero o derribar muros (Helbing et al., 2002)



**Figura 1.7:** Fotografía de larga exposición de una multitud altamente densa. Las zonas borrosas muestran las zonas con turbulencia, es decir donde las personas no controlan sus movimientos, sino que estos son determinados por las enormes fuerzas del grupo. Tomado de Johansson et al., 2008.

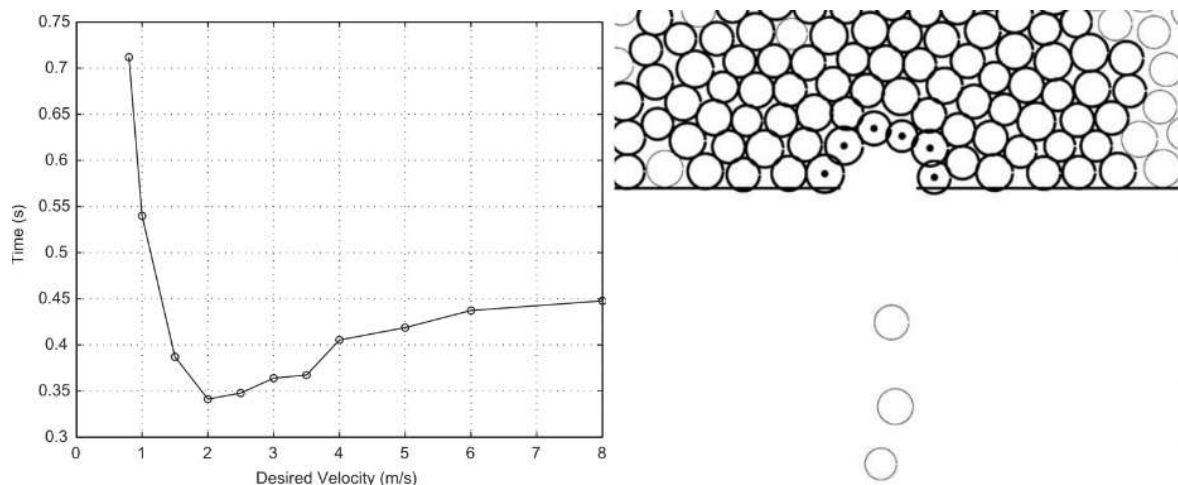
### 1.3.8 Bloqueos u Obstrucciones

Los comportamientos emergentes conocidos en inglés como “*Faster-is-slower*” y “*Freezing-by-heating*” se caracterizan por individuos ansiosos (o incluso en estado de



pánico) que buscan moverse más rápido de lo que se los permite el flujo en el que se encuentran, generando mayor competencia por el espacio disponible y finalmente produciendo bloqueos de diferente duración en la multitud.

El fenómeno *Faster-is-slower* se presenta en flujos unidireccionales que se mueven a través de estructuras como pasillos, puertas u otros cuellos de botella, como consecuencia del impulso de los peatones de adelantarse entre sí, lo que genera conflictos por el espacio disponible y finalmente bloqueos en el flujo como producto de la fricción entre individuos. De esta manera, cuando la velocidad de movimiento deseada por el peatón es baja, incrementarla reducirá el tiempo total de evacuación, sin embargo, aumentarla por encima de cierto nivel llevará a mayores tiempos de evacuación, Experimentos han demostrado que en ciertas ocasiones se pueden generar bloqueos en forma de arco cuando la fricción entre individuos es demasiado alta, o en estructuras en las que intuitivamente no debería presentarse este fenómeno como ensanchamientos de rutas de escape (Helbing et al., 2002).



**Figura 1.8:** Tiempo promedio de obstrucciones en función de la velocidad deseada en una evacuación de 200 peatones (izquierda). Formación de una obstrucción en forma de arco, *Faster-is-slower* producto del conflicto entre seis peatones que intentan atravesar primero (derecha). Tomado de Parisi & Dorso, 2005.

El fenómeno *Freezing-by-heating* o Congelamiento por calentamiento, se presenta en flujos bidireccionales en los que ya es visible el fenómeno de formación de carriles, pero en los que se identifica un aumento en la densidad, cuando los individuos intentan sobrepasar a las personas que se encuentran delante, lo que lleva a que les encuentren de frente con aquellos que se dirigen en el sentido opuesto, produciendo bloqueos o estancamientos. El nombre obedece a que el aumento en la fuerzas de fluctuación, que corresponde a las variaciones que el sistema ejerce sobre el individuo, puede ser interpretado como la temperatura, pero en lugar de llevar a la multitud a un estado de mayor flujo (como en un estado líquido o gaseoso) lo lleva a un estado estático, similar a un sólido, un cristal, o un fluido congelado (Helbing et al., 2005, 2001).

## 1.4 Medidas de desempeño

La evaluación cuantitativa de las multitudes se realiza a una escala global cuando se tiene en cuenta la totalidad de sus individuos, y a nivel local cuando se requiere determinar el comportamiento de ciertos individuos, estructuras o fenómenos particulares. No hay una directriz general sobre la geometría del área que debe ser utilizada al momento de hacer las evaluaciones locales, sin embargo, se han encontrado múltiples estudios que sugieren el uso de circunferencias de un radio definido arbitrariamente por el investigador, con base en los límites geométricos de la estructura y el tamaño de los peatones. De forma similar, considerando que un peatón puede estar parcialmente dentro del área estudiada, se ha encontrado que uno de los criterios para definir su estado (adentro o afuera) es analizar si la posición central de la cabeza se encuentra o no dentro de los límites del área (Johansson et al., 2008).

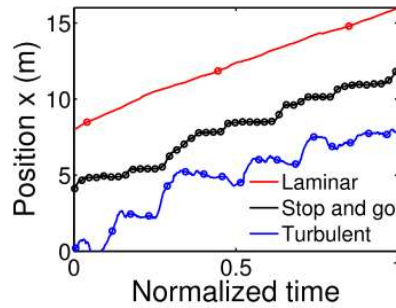
Las principales variables utilizadas en el estudio de las multitudes son la densidad, la velocidad y el flujo. La densidad se refiere a la cantidad de peatones divididos por el área que ocupan, cuando se evalúa a una escala global es común utilizar el área total de la estructura estudiada o el cálculo del área que posee el polígono más pequeño capaz de contener a todos los peatones en el lugar en que se encuentran.

La variable de velocidad por otro lado depende de cada individuo en un momento determinado por lo que las mediciones locales y globales corresponden al promedio de las lecturas de los individuos contenidos en el área estudiada, o en la totalidad de la multitud respectivamente.

El flujo es calculado de la misma manera que en la dinámica de fluidos (asumiendo la cantidad de peatones de forma análoga a la masa del fluido) como el producto de la densidad por la velocidad, y se puede interpretar como la cantidad de personas que atraviesan una sección transversal (en general perpendicular a la dirección de movimiento) por unidad de tiempo, divididas entre la longitud de dicha sección.

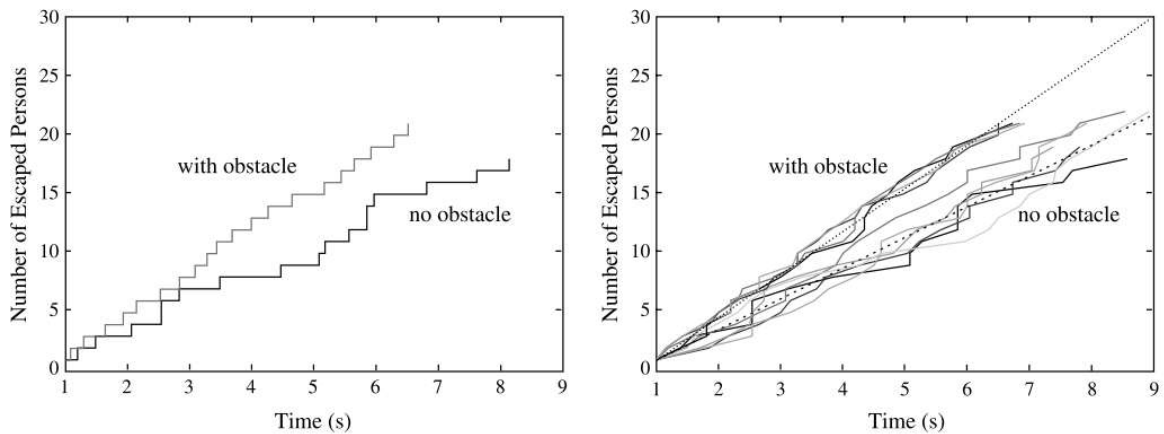
El diagrama fundamental permite mostrar la relación entre el flujo y la densidad de una multitud, y se utiliza para determinar la capacidad máxima de las estructuras que se considera segura, (a partir de la cual se reduce el flujo de la multitud). Sin embargo no es adecuado para generalizar estimaciones de capacidad como sugieren diferentes guías de seguridad y planeación, por ejemplo "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", "Planning for foot traffic flow in buildings" y "Transporttechnik der Fussgänger" (Chattaraj et al., 2009). El motivo es que puede llegarse a conclusiones equivocadas al asumir que grupos con la misma densidad, pero cuyos individuos tienen dimensiones considerablemente diferentes, tendrán la misma libertad o espacio para moverse (Johansson et al., 2008).

Al graficar el avance de un individuo de un grupo con respecto al tiempo transcurrido es posible identificar si su movimiento es fluido o laminar (avance continuo), o si se está presentando un fenómeno de formación de ondas (avance interrumpido), o de turbulencia (movimientos rápidos, pausas bruscas e incluso retrocesos) como se muestra en la siguiente gráfica (Helbing & Johansson, 2013).



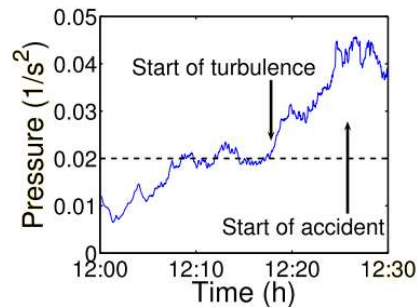
**Figura 1.9:** Posición de un peatón con respecto al tiempo para tres tipos de flujo: Laminar o normal, *Stop-and-go*, y turbulento. Tomado de Helbing & Johansson, 2013.

Durante evacuaciones, es posible generar mediciones adicionales como por ejemplo la cantidad de personas evacuadas, heridas, fallecidas en el tiempo transcurrido. Visualizar este tipo de series de forma escalonada en lugar líneas continuas permite identificar momentos en los que ocurren obstrucciones pues aparecen como líneas horizontales más anchas, representando el tiempo que transcurre sin que nadie escape.



**Figura 1.10:** Gráficas de cantidad de personas evacuadas a través del tiempo. La gráfica escalonada de la izquierda permite identificar más fácilmente las obstrucciones. Tomado de Helbing et al., 2005.

En los casos de emergencia, ni la densidad ni la velocidad son buenos estimadores cuantitativos de la criticidad de la multitud, en su lugar, la varianza de las velocidades locales multiplicado por la densidad local permite identificar mejor las situaciones en que las multitudes empiezan a presentar comportamientos peligrosos, a este indicador se le conoce como presión de la multitud (Johansson et al., 2008).



**Figura 1.11:** Gráfica de presión de la multitud a través del tiempo. Tomado de Johansson et al., 2008.

## 1.5 Recomendaciones

El estudio de la dinámica de multitudes ha brindado frutos hasta el momento identificando las causas de las principales tragedias hasta el momento, en este sentido se han recopilado las siguientes recomendaciones en los ámbitos de diseño de estructuras, mitigación de riesgos en casos de emergencia y políticas relacionadas con la operación de estos espacios (Almeida et al., 2013; Hajibabai et al., 2007; Helbing et al., 2005, 2002; Johansson et al., 2008; Tan, Hu, & Lin, 2015)

### Diseño de estructuras:

- En lo posible. reducir las intersecciones, los contraflujos, e incluso las uniones de flujos.
- En flujos bidireccionales crear obstáculos que delimiten o estabilicen el espacio destinado a cada sentido, como columnas que desde la dirección de caminata se vean como muros, reduciendo choques y la probabilidad de que emerja el fenómeno Freezing-by-heating.
- Los flujos en cuellos de botella pueden ser optimizados diseñando estas estructuras con forma de embudo.
- En flujos bidireccionales dos puertas separadas brindan un mejor flujo que una puerta con el doble de ancho.
- Diseñar los espacios para minimizar los cuellos de botella, y evitar que objetos como por ejemplo equipaje, obstaculicen el flujo de peatones.
- Diseñar las estructuras como sistemas de válvulas, es decir que puedan impedir el paso de una zona a otra, segmentando la multitud y reduciendo la presión en las zonas que se considere necesario.
- Incluir obstáculos como pilares o columnas antes de los cuellos de botella o en el medio de intersecciones muy transitadas.
- En general las dimensiones mínimas de las rutas de escape están reguladas por la ley y las construcciones raramente las exceden, sin embargo esto no siempre tiene sentido considerando que la cantidad de personas que intenta escapar aumenta con cada piso, cada pasillo etc, en este sentido se debería contar con

rutas de escape que se ensanchen de acuerdo a la cantidad de peatones que se integran a ellas.

- Las escaleras largas representan un peligro adicional para las personas que las utilizan en situaciones de emergencia, especialmente si las mismas son largas y las salidas de emergencia se encuentran hacia abajo. El riesgo de caídas se reduce reemplazando las escaleras por rampas o dividiéndolas en segmentos con direcciones de descenso diferentes.

**Planes de emergencia:**

- Entrenar líderes que conozcan las rutas y mantengan la calma.
- Realizar simulacros periódicamente para que las personas que ocupan un edificio se familiaricen con las rutas de escape, las personas responsables en caso de emergencias y los procedimientos definidos para esos casos.
- Evitar comunicar las rutas de escape al público a través de mapas. Utilizar en su lugar señalizaciones que hagan uso de la luz, el color, el movimiento y el contraste, acompañadas de indicaciones auditivas grabadas con anterioridad.
- Uso de rutas especiales para personas cuya velocidad de movimiento es inferior a la de los demás como por ejemplo utilizar los elevadores para personas en sillas de ruedas, ancianos, embarazadas etc.

**Políticas de operación:**

- Se deben remover los obstáculos en las estructuras dedicadas exclusivamente al tráfico, por ejemplo remover sillas de pasillos, e incluso prohibir que las personas descansen en ellas.
- Algunas áreas deben ser dedicadas para ser usadas únicamente en caso de emergencia y el acceso a ellas debe ser restringido en todos los otros casos.
- Se debe monitorear las zonas donde puedan existir conflictos como cuellos de botella y cruces de flujos, especialmente durante las horas de mayor tráfico, y en lo posible incluir herramientas automatizadas que brinden información con respecto a la densidad, velocidad y presión de la multitud en tiempo real para facilitar el trabajo de los responsables de tomar decisiones con respecto a la seguridad.
- Se ha identificado que las densidades máximas (locales) en una multitud pueden superar el doble de la densidad global de la misma, por lo que es recomendable que los eventos se planeen para densidades de máximo 4 personas por metro cuadrado. De manera similar, en algunos eventos se debe limitar la asistencia, manteniendo un 30% de margen con respecto a la capacidad total de la estructura.



## 2. Acercamientos al problema

Al igual que en muchos otros problemas, se han utilizado enfoques bastante variados para estudiar el fenómeno de la dinámica de multitudes, y se han generado teorías sobre su funcionamiento. Sin embargo, en el caso de la dinámica de multitudes existe un consenso sobre la dificultad de validar las teorías y los modelos sobre la dinámica de multitudes, al igual que la existencia de límites para generalizar los resultados obtenidos, no solo por las diferencias en la composición de la multitud o influencias culturales (Helbing et al., 2005), sino también porque se considera cuestionable si aquellos modelos calibrados para situaciones específicas de baja densidad reflejan correctamente los comportamientos en densidades altas (Duives et al., 2014). Esta situación obedece a dos problemas principales: la particular naturaleza interdisciplinaria del fenómeno, donde actúan variables físicas, sociales y psicológicas; y la dificultad de contar con información cuantitativa y reproducible bajo condiciones seguras de los principales comportamientos emergentes, principalmente los que pueden generar tragedias como flujos con turbulencia y Freezing-by-heating. Este último factor es el gran reto de los modelos de simulación (Helbing et al., 2005).

Una descripción de las características básicas de los modelos de simulación utilizados en el estudio de las multitudes puede realizarse con base en la clasificación realizada por Gwynne que incluye el propósito del modelo, la representación del entorno, de la población y la perspectiva sobre el comportamiento de los individuos (Gwynne, Galea, & Owen, 1999)

Con respecto al propósito o alcance del modelo se han definido tres categorías. La más simple busca la optimización del flujo de personas, en general estos modelos simulan multitudes con enormes cantidades de personas en donde no se tienen en cuenta los aspectos individuales de estos, sino que en general asumen comportamientos óptimos de todos los peatones (como velocidad, dirección, ruta de escape escogida, etc.). El resultado de estos modelos es la estimación matemática de tiempos de evacuación y capacidades de las estructuras. Por otro lado, Los modelos cuyo propósito es la simulación de la multitud incluyen adicionalmente la estimación de las decisiones tomadas por los individuos, incluyendo por ejemplo diferentes rutas de evacuación. El nivel de mayor complejidad es el de estimación de riesgo, en el cuál, además la identificación de peligros asociados a la evacuación como consecuencia de las acciones de los individuos que participan en ella. Pueden incluir también factores de riesgo como fuego, humo, etc. Otra caracterización con respecto a la escala tiene que ver con la importancia que se le da a las interacciones físicas entre los individuos, cuando estas se tienen en cuenta el modelo es microscópico, por otro lado si se ignoran se dice que el modelo es macroscópico (Hamacher & Tjandra, 2002). Esta clasificación contrasta con la

que realiza (Almeida et al., 2013) en donde menciona que las simulaciones computacionales pueden clasificarse de acuerdo a su propósito como aquellas que buscan poner a prueba hipótesis y teorías, aquellas que ponen a prueba estrategias de diseño y finalmente las que buscan crear fenómenos frente a los cuales teorizar.

La representación de la estructura, es decir los espacios del edificio, los obstáculos y la conectividad entre ellos, es otro aspecto que diferencia los modelos. Mientras que los modelos matemáticos la representan principalmente como una red, con nodos y arcos, otros modelos, lo hacen a través de rejillas cuadradas o hexagonales. Por último, los modelos más recientes representan el espacio de forma continua, es decir ubicando elementos que representan los obstáculos como muros o muebles sobre un espacio vacío que representa el espacio transitable por los peatones.

La perspectiva sobre la población está relacionada parcialmente con el propósito del modelo y con las densidades esperadas en la multitud, ya que en densidades bajas se ha encontrado similitudes con el comportamiento de gases, mientras que en densidades medias y altas se relacionan más con fluidos y flujos de partículas (Helbing et al., 2002). Los modelos que siguen esta analogía generalmente tienen un propósito únicamente de optimización y dado que no representan a los peatones de forma individual, tampoco existe una evaluación individual de la forma en que cada peatón toma sus decisiones. En los casos de modelos de simulación y estimación de riesgos se puede dar una perspectiva global, el caso en que todos los individuos son afectados de la misma manera y por lo tanto no hay realmente decisiones particulares; y una perspectiva individual, en la que cada peatón posee características individuales y tiene la capacidad de reaccionar de manera diferente ante los mismos estímulos.

Las diferencias en la perspectiva sobre el comportamiento, que se refieren a las respuestas de los peatones en las interacciones de gente con gente, gente con la estructura y la gente con el entorno, son categorizadas por Gwynne en 5 tipos: sin reglas de comportamiento, comportamiento de analogía funcional, comportamiento implícito, sistema basado en reglas e inteligencia artificial (Gwynne et al., 1999).

En los modelos sin reglas de comportamiento, los individuos reaccionan únicamente con base en las interacciones físicas con otros individuos y la representación de la estructura. Los modelos donde existe una analogía funcional del comportamiento se han definido funciones que intentan imitar las reacciones que tendrían los individuos bajo ciertas condiciones, estas funciones afectan a toda la población por igual. El comportamiento implícito indica que un modelo imita los comportamientos de los peatones a través de métodos físicos complicados. Por otro lado, los sistemas basados en reglas tienen comportamientos explícitamente definidos, por ejemplo huir de una habitación con humo, que afectan a los individuos en la misma forma. Por último los modelos de comportamientos reflejados con inteligencia artificial se caracterizan por individuos diseñados para imitar la inteligencia humana, o una aproximación de ella con respecto a las respuestas frente al ambiente que lo rodean.

Zhou presenta una simple clasificación de los modelos según la representación de los peatones, entre modelos basados en flujos, basados en entidades o partículas, y aquellos basados en agentes (Zhou et al., 2010). Estos tipos de modelos, que tienen en



cuenta los más utilizados y relevantes de los últimos años, será abordada con mayor profundidad en la siguiente sección.

## 2.1 Modelos basados en flujos

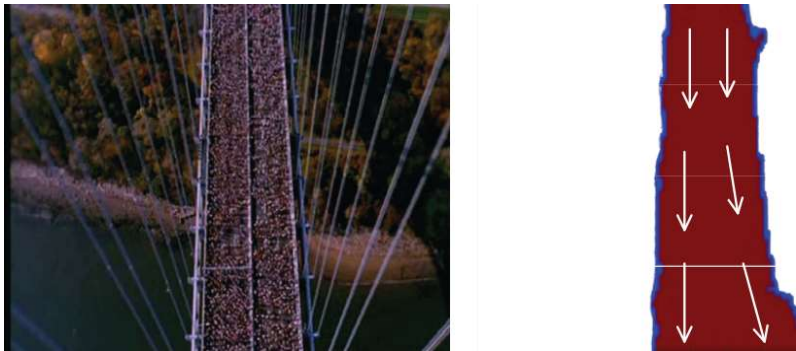
Los modelos basados en flujos son utilizados para la simulación de multitudes compuestas por decenas de miles de individuos, durante un tiempo relativamente corto. Los principales campos en que son utilizados estos modelos son en la planeación civil, la estimación de tiempos y rutas óptimas de evacuación y la animación de multitudes de gran tamaño en ambientes virtuales, es decir la generación de efectos visuales especialmente apropiados para el entretenimiento digital como películas y videojuegos (Zhou et al., 2010). Debido a que la multitud es representada como una entidad única en lugar de un grupo compuesto por diferentes individuos, estos modelos no son apropiados para reproducir todos los comportamientos emergentes, en especial los de multitudes cuya densidad es muy alta y se presentan fuerzas de contacto y fricción entre los peatones, o en los que no existe un objetivo global de toda la multitud, que es la situación más frecuente de las multitudes.

En estos modelos los espacios son representados usualmente como un campos de velocidad o potencial, o como una red de nodos y arcos. El campo de velocidad se refiere a un conjunto de casillas que define una región pequeña donde existe una velocidad constante y fija, que define el pacto de varios factores ambientales sobre el movimiento de la multitud, producidos por muros, obstáculos, peligros, etc. Por otro lado, cuando el entorno es representado como una red, los nodos de la misma representan los diferentes espacios por los que se pueden mover los peatones como habitaciones, pasillos, escaleras, etc., la capacidad del nodo indica la cantidad de peatones que puede contener el espacio simultáneamente. Los arcos de la red definen la conectividad de los nodos y la capacidad de peatones que pueden cruzar de un espacio a otro en un tiempo determinado (Almeida et al., 2013).

La principal diferencia de este acercamiento en relación a los otros es que la multitud es representada como una única entidad cuyas propiedades simulan las de un fluido o partículas dentro de un fluido. Esto quiere decir que muchas características particulares o individuales de los peatones no son tenidas en cuenta o se asume que son homogéneas para todos los miembros de la multitud como por ejemplo el conocimiento del entorno, la ruta de escape deseada, las relaciones entre peatones, la velocidad de movimiento, etc. (Treuille, Cooper, & Popović, 2006). En particular este acercamiento impide que se generen densidades locales diferentes o la formación de grupos, y requiere que el movimiento de la multitud sea descrito usando algunas ecuaciones diferenciales, que en conjunto con el uso de campos de velocidad dependen de hipótesis y supuestos estadísticos cuya validez suele ser discutible. Si bien es posible corregir algunos comportamientos como maniobras de desaceleración y evasión de colisiones, que no obedecen a la conservación de la energía y el momento, propios de los fluidos, para aplicaciones prácticas es más apropiado utilizar simulaciones donde se considere el movimiento de cada peatón (Helbing et al., 2002).

De manera similar a las características individuales de los peatones en una multitud, los comportamientos de la multitud son ampliamente simplificados o ignorados en este tipo de modelos, ocupando únicamente las dos primeras categorías en la clasificación de Gwynne, es decir aquellos sin reglas de comportamiento y otros un poco más recientes con comportamientos de analogía funcional.

Las principales contribuciones a este tipo de modelos corresponden a la herramienta EVACNET4 desarrollado por (Kisko, Francis, & Nobel, 1998) en la que la multitud atraviesa una red simple con un movimiento bastante simplificado. El siguiente avance corresponde a las propiedades de las ecuaciones de (Hughes, 2003). Luego, (Chenney, 2004) presenta un modelo llamado “*Flow Tiles*” en el que el espacio no es representado por una red de habitaciones y conexiones, sino por un campo de velocidad compuesto de pequeñas “baldosas” lo que aumenta el detalle y realismo del movimiento. Por último, (Treuille et al., 2006) lleva las ecuaciones de Hughes a un modelo capaz de simular de forma realista grandes multitudes. Desde entonces se ha usado por la industria del entretenimiento con modelos cada vez más eficientes.



**Figura 2.1:** Foto de una multitud altamente densa durante una maratón y su representación como flujo. Tomado de Zhou et al., 2010.

## 2.2 Modelos basados en partículas

De acuerdo a (Zhou et al., 2010) los modelos basados en partículas o entidades son definidos como aquellos que tienen una representación de cada individuo, generalmente como entidades homogéneas, cuyos movimientos son determinados por un conjunto de reglas globales y locales que representan las influencias físicas, psicológicas y sociales que actúan sobre los peatones. Al igual que los modelos basados en agentes, los basados en partículas han sido utilizados para el estudio de los fenómenos propios de la dinámica de multitudes, el diseño de estructuras y la planificación de eventos más seguros.

Aunque no siempre es clara el criterio que separa los modelos basados en partículas de los basados en agentes y dependiendo del autor se podría clasificar el mismo modelo de forma diferente, se considera que los agentes poseen características individuales que

influyen su percepción, decisión y acción, de modo que dos agentes ante los mismos estímulos pueden responder de forma diferente. Es esta capacidad del agente decidir e influenciar el entorno y a otros agentes la característica distintiva que se utiliza en este documento para separar los modelos basados en partículas de aquellos basados en agentes (Zhou et al., 2010).

Los modelos basados en partículas son utilizados en la simulación de multitudes cuyo tamaño llega hasta los miles de peatones, los dos principales modelos de esta categoría, Autómata celular y Fuerzas sociales, difieren en la representación del espacio y el tiempo, discreto en el primer caso y continuo en el segundo. Ambos han sido ampliados a partir de su concepto inicial para incluir factores de comportamiento, estos modelos extendidos podrían considerarse por algunos autores como parte de la categoría de modelos basados en agentes, sin embargo serán tratados a continuación.

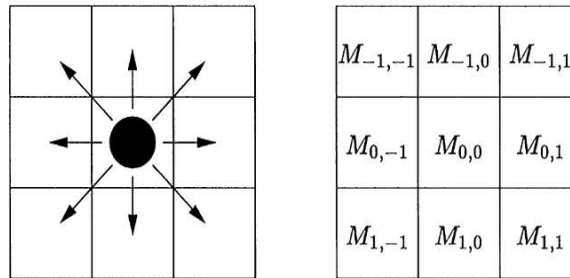
### 2.2.1 Autómata celular

El modelo de Autómata celular fue desarrollado por (Burstedde, Klauck, Schadschneider, & Zittartz, 2001) y se diferencia por su particular representación de la infraestructura y obstáculos, en la que utiliza una matriz bidimensional para definir una rejilla a través de la cual navegan los peatones en unidades de tiempo discretas.

En el modelo original cada celda tiene una forma cuadrada y un tamaño de 40cm x 40 cm, definido por los autores a partir de las dimensiones estándar con las que contaban: espacio típico ocupado por un peatón en una multitud densa, y de la velocidad promedio de un peatón (1.3 m/s) de modo que el estado de la rejilla es calculado con una frecuencia de 0,3 segundos. Cada casilla, célula o celda de esta rejilla puede encontrarse vacía, ocupada por un peatón u ocupada por un objeto como parte de un muro o una columna.

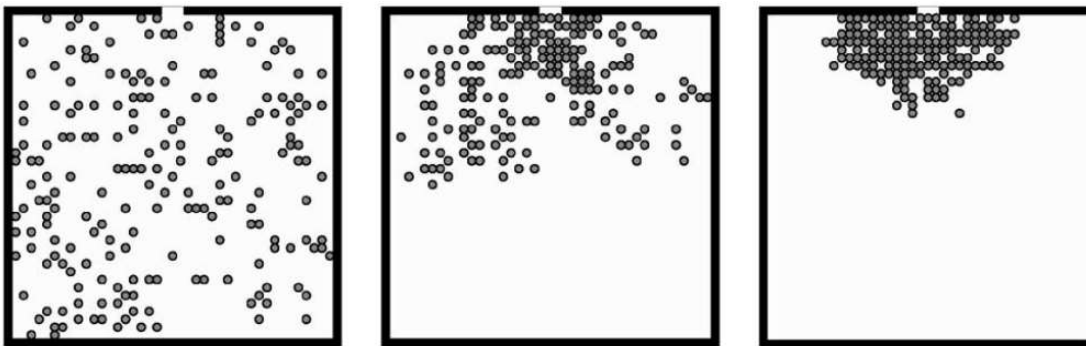
Los peatones entonces solo pueden ubicarse dentro de una celda en un momento dado, y el movimiento entre celdas al igual que la resolución de conflictos cuando dos o más peatones intentan ocupar la misma celda, está determinada por una matriz de transición de 3x3, que representa la probabilidad de movimiento hacia una de las 8 celdas contiguas, o de no moverse en absoluto, como se muestra en la figura 2.2 . Cada peatón puede tener una matriz de transición diferente, con lo que pueden simularse poblaciones con individuos de diferentes características.

Adicionalmente existen factores que afectan esta matriz durante la simulación, los principales son el humor o estado de ánimo, y campos de piso ("*floor field*" en inglés) utilizados para mejorar el flujo cerca de los obstáculos.



**Figura 2.2:** Opciones de movimiento y matriz de transición. Tomado de Burstedde et al., 2001.

El estado de ánimo es una variable binaria con los estados “feliz” e “infeliz”, un peatón pasa de estado feliz a infeliz si tras tres intentos no puede moverse, y pasa de infeliz a feliz tras 4 unidades de tiempo consecutivas en las que logró moverse a la celda deseada. El supuesto detrás de esta regla es que es más probable que un peatón feliz continúe moviéndose en su dirección deseada, mientras que el movimiento de uno infeliz será más aleatorio. Por otro lado los campos de piso sirven para marcar lugares de interés permanentes como salidas de emergencia, exposiciones de arte, entre otros, y otros que dependen del momento o la situación, como aquellas zonas que son más transitadas por otros peatones, utilizando una lógica similar a la quimiotaxis de las bacterias, solo que en lugar de dejar rastros químicos, un peatón modifica el valor de campo de piso de una celda cuando pasa por ella, aumentando la probabilidad de que vuelva a ser utilizada conforme más peatones pasan por ella, y reduciendo dicha probabilidad con el tiempo.



**Figura 2.3:** Fases de evacuación de una habitación. Tomado de Burstedde et al., 2001.

El modelo presenta un costo computacional bajo considerando la cantidad de peatones simulados, esto gracias a la simplificación del entorno y el procesamiento de gran parte de la información en los campos de piso en lugar de cada peatón. En el mismo sentido es necesario mencionar que originalmente el modelo era capaz de reproducir solamente el fenómeno de formación de carriles, y que diferentes autores han realizado extensiones al modelo para incluir otras como enajenación y obstrucciones unidireccionales (*Faster-is-*

*slower*), pero que la representación de la estructura y el espacio presentan límites al realismo del modelo tanto en el movimiento de los peatones como en las particularidades de sus interacciones. Por ejemplo en la figura 2.3 se observan las tres fases principales de la evacuación simulada por (Burstedde et al., 2001), en donde la posición de los peatones sigue la estructura cuadrículada de la rejilla que representa el espacio, la dimensión de la puerta está limitada a los múltiplos de 0.4m y finalmente no es posible estudiar la dinámica de movimientos de una multitud con peatones de diferentes dimensiones, estas limitaciones se observan aunque en menor medida en los modelos derivados de este.

## 2.2.2 Fuerzas sociales

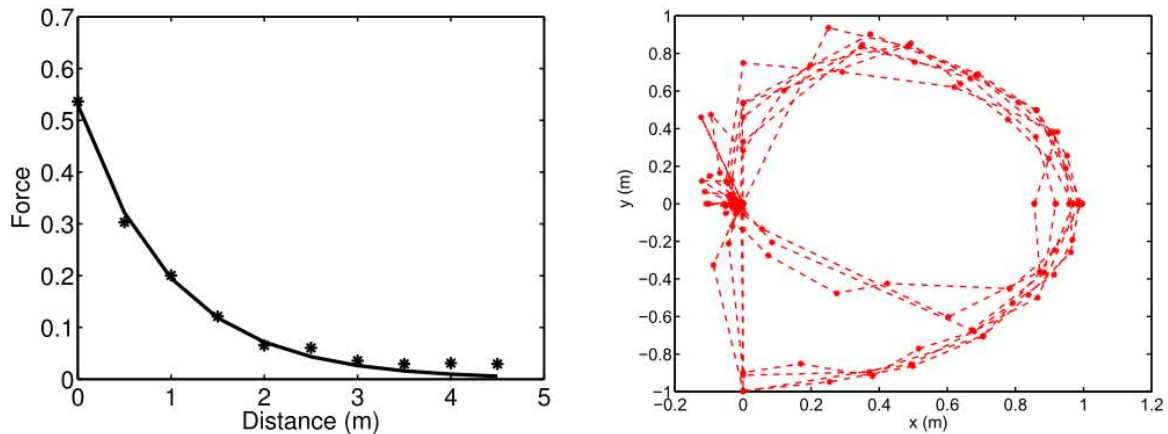
Desarrollado por (Helbing, 1998), Fuerzas sociales es un modelo microscópico que se caracteriza por simular en tiempo y espacio continuos el movimiento de peatones en estado normal y de pánico, a través de la interacción de fuerzas de atracción y repulsión ejercidas sobre ellos por obstáculos, puntos de interés y otros peatones, traducidas en aceleración y cambios de dirección. Este modelo permite replicar la mayoría de los comportamientos emergentes de las multitudes, y dado que la calibración de los parámetros no depende de la configuración del espacio permite la evaluación de nuevos diseños o soluciones sin necesidad de ajustar el modelo (Helbing & Johansson, 2013).

Cada peatón es representado como un punto  $\alpha$  de masa  $m$ . La aceleración del mismo está definida por tres factores, el primero corresponde al movimiento de esta partícula en la dirección deseada inicialmente  $e_\alpha^0$  con la velocidad  $v_\alpha$ , que intenta corregir con un intervalo de tiempo  $t$ , para que sea igual a la velocidad deseada  $v_\alpha^0$  (primer término de la ecuación 1). El segundo factor se refiere a las interacciones de repulsión con los otros peatones  $\beta$ , que depende tanto de la distancia entre estos como del ángulo entre ellos, la repulsión con respecto a los muros se trata de forma análoga a la de otros peatones (segundo término de la ecuación 1). Finalmente la aceleración de la partícula es afectada también por las fuerzas de atracción a puntos de interés y peatones con los que se tiene alguna relación  $i$  (tercer término de la ecuación 1). De esta manera el modelo de fuerzas sociales está dado por:

$$m_\alpha \frac{d v_\alpha}{dt} = m_\alpha \frac{v_\alpha^0(t) e_\alpha^0 - v_\alpha(t)}{\tau_\alpha} + \sum_{\beta \neq \alpha} f_{\alpha\beta}(t) + \sum_i f_{\alpha i}(t) \quad (1)$$

La dependencia de la distancia, el ángulo y la velocidad relativa entre los peatones al momento de calcular sus interacciones tienen implicaciones importantes sobre el comportamiento de las partículas. Si bien en las primeras versiones del modelo se consideraba que la reducción de la dependencia con respecto a la distancia seguía una curva circular, recientemente (Helbing & Johansson, 2013) han modificado dicho parámetro para reflejar una forma elíptica, aumentando la distancia en la que desaparece la interacción, este fenómeno se observa más claramente en la gráfica izquierda de la figura 2,4, obtenida a partir de un método de ajuste evolutivo. Este factor permite la reproducción de fenómenos como los contactos físicos, especialmente durante estados de pánico, y las fuerzas de fricción entre peatones. Por otro lado el ángulo entre los peatones es importante por que los individuos tienden a tener respuestas más fuertes o

evidentes a la presencia de individuos que están al frente en comparación a aquellos que se encuentran a los lados o detrás, un ejemplo de esta variación se puede observar en la gráfica derecha de la figura 2.4. El impacto de la velocidad relativa de los peatones sobre su movimiento es discutible, ya que inicialmente (Helbing et al., 2005) menciona que el impacto de este factor no tiene grandes impactos cualitativos sobre los fenómenos de la dinámica de multitudes, pero dado que puede influir en algunos aspectos cuantitativos lo incluye en versiones posteriores, implícito en la dependencia de la distancia (Helbing & Johansson, 2013).



**Figura 2.4:** Fuerza de las interacciones entre peatones con respecto a la distancia (izquierda) y al ángulo (derecha) Tomado de Helbing & Johansson, 2013.

La principal ventaja de las simulaciones basadas en el modelo de fuerzas sociales es su simplicidad y bajo número de parámetros, y dado que no es necesario calibrarlos para cada situación el modelo es apto para la predicción de flujos de peatones en entornos nuevos, es decir nuevas estructuras y situaciones normales y de pánico (Helbing et al., 2005), por lo que no es extraño que sea el modelo microscópico más citado (Manley, 2012). Por otro lado, también se han identificado algunas desventajas del modelo, como por ejemplo la representación homogénea de los peatones no es adecuada para modelar los factores psicológicos y sociales de un ser humano, la definición de la fuerza física que representa una influencia social requiere de bastantes intentos para que parezca real y en contradicción de lo mencionado por Helbing, (Zhou et al., 2010) indica que el costo computacional del modelo es generalmente alto debido a la complejidad cuadrática de la computación de las fuerzas.

El modelo ha sido extendido para reducir problemas en casos específicos como partículas que parecen vibrar y rebotar, y para incluir características físicas, psicológicas y sociales diferentes a cada partícula, así como cálculos generalizados e individuales de rutas de escape y navegación del entorno, que podrían categorizarse como modelos basados en agentes o híbridos. (Helbing et al., 2002; Nuria Pelechano & Badler, 2006; Song, Xu, Wang, & Ni, 2006; Xu et al., 2015; Zheng et al., 2009; Zhou et al., 2010).

## 2.3 Modelos basados en agentes

En este documento la capacidad de influir sobre otros agentes y el entorno a través de decisiones tomadas individualmente es suficiente para considerar un modelo dentro de la categoría de basado en agentes, aunque es necesario mencionar que algunos autores consideran que son necesarias además cualidades adaptativas, otros creen que cualquier tipo de independencia es suficiente (Chhugani et al., 2009; Winter, 2012), y otros no hacen distinción entre modelos basados en partículas y modelos basados en agentes.

Los modelos basados en agentes pertenecen a la categoría de modelos microscópicos y simulan multitudes de pequeño y mediano tamaño que actualmente abarcan hasta los miles o decenas de miles de peatones dependiendo principalmente de la complejidad del modelo y de la capacidad de computo de los equipos en que se ejecute la simulación. Aunque el modelamiento por agentes ha sido desarrollado por múltiples autores desde mediados del siglo pasado, solo en las dos últimas décadas ha sido popular en el estudio de la dinámica de multitudes (Zhou et al., 2010). Esta popularidad se justifica principalmente por la habilidad de capturar comportamientos emergentes de todos los agentes en los sistemas complejos (Chen, 2008).

La representación de las estructuras y obstáculos propios del entorno dependen directamente del propósito y supuestos del modelo, por ejemplo se tienen modelos de espacio discreto basados en el modelo de autómata celular, en los que una cuadrícula define una cantidad finita de puntos en los que puede estar un agente, reduciendo el costo computacional del calculo de rutas y evasión de colisiones y permitiendo de manera simultánea mayor complejidad en las variables del agente, sus procesos de percepción y de decisión (Tan et al., 2015). Las representaciones tridimensionales del entorno se utilizan principalmente para realizar animaciones del movimiento de los agentes (Chhugani et al., 2009; Smith, 2008) aunque esto requiere mayor uso de los recursos computacionales y el desarrollo de una cantidad mayor de animaciones, por ejemplo la animación de correr es diferente a la de trotar o caminar, la de subir escaleras es diferente a la de bajarlas, etc. Las representaciones bidimensionales se basan en los planos de las estructuras, es decir que son la vista superior de muros y demás obstáculos. A diferencia del modelo de autómata celular utilizan un espacio virtual continuo, por lo que las dimensiones de los obstáculos no están restringidas por el tamaño de la cuadrícula, permitiendo simulaciones mas cercanas a la realidad y evaluar un rango más amplio de escenarios (Duives et al., 2014), y por otro lado las animaciones son mucho más sencillas pues consisten en aumentar o reducir la velocidad y girar al agente con respecto a la dirección de movimiento.

En este tipo de modelos cada individuo es representado como un agente inteligente y autónomo, con atributos y estados propios que lo diferencian de otros agentes, capaz de interactuar con el entorno virtual y generalmente solo con una cantidad limitada de otros agentes (Railsback, S. F., & Grimm, 2017; Zhou et al., 2010). Múltiples representaciones gráficas se han utilizado, desde animaciones tridimensionales hasta simples puntos en una cuadrícula, sin embargo la más utilizada es una figura geométrica bidimensional (triángulos, círculos, óvalos o polígonos compuestos) de la vista superior de los peatones. En muchos casos la forma del agente tiene poco impacto sobre los

comportamientos emergentes en la simulación (Helbing et al., 2005), hay fenómenos en los que una silueta ovalada o más cercana al contorno real de los peatones es necesaria para una representación correcta, por ejemplo cuando hay peatones con diferentes niveles de ansiedad, es usual que aquellos con mayor prisa avancen anteponiendo un hombro para abrirse paso. Por otro lado, una variación en el tamaño de los agentes es importante para reflejar la variación demográfica en la población y su correspondiente dinámica (Johansson et al., 2008).

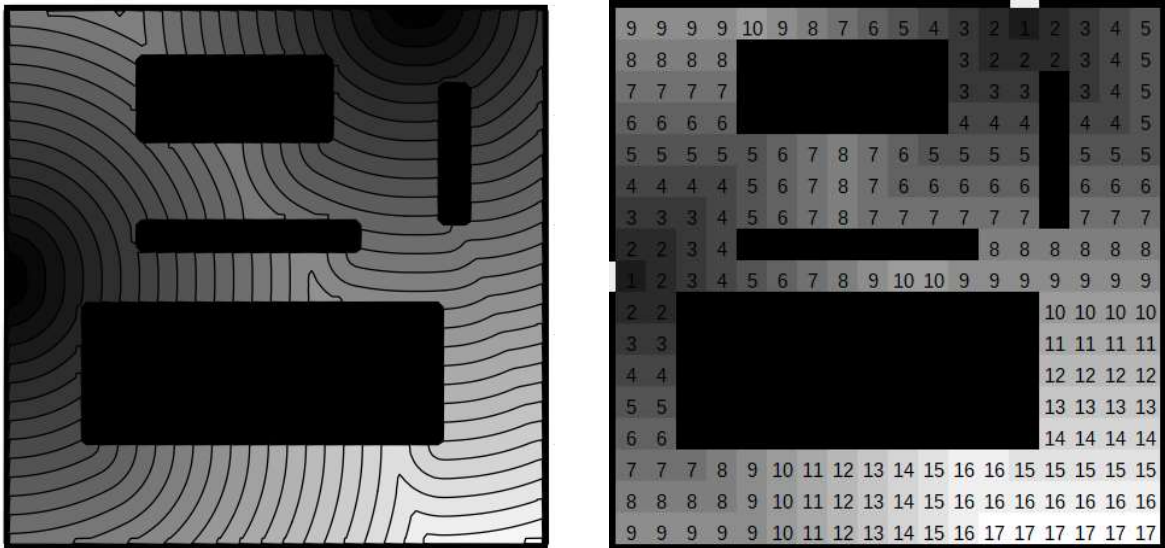
En el transcurso de la simulación, los agentes perciben los cambios en el entorno, ya sea completamente o de forma limitada o incompleta (Chen, 2008), generalmente mediante la emisión de rayos virtuales en diferentes direcciones y midiendo su intersección con los objetos alrededor del agente (N. Pelechano et al., 2007). Basados en esta información hacen una evaluación sobre el estado del entorno y sobre sí mismos, y toman decisiones que se ven afectadas también por sus características psicológicas o emocionales.

La navegación de los agentes a través del entorno virtual se divide en dos fases, una de alto nivel o global en la que se realiza la planeación de la ruta teniendo en cuenta principalmente los obstáculos del entorno y los peligros identificados como fuego, humo, etc., y otra de bajo nivel o local en la que se tienen en cuenta los obstáculos del entorno inmediato como los otros agentes para calcular la dirección que se debe tomar para acercarse al siguiente punto de la ruta global y evadir las posibles colisiones (N. Pelechano et al., 2007).

El costo computacional de la navegación global está determinado por el tamaño del entorno virtual, la cantidad de agentes y el propósito del modelo, por ejemplo en un modelo que simule los visitantes de un centro comercial en estado de calma, cada peatón o familia tendrá su propio conjunto de destinos (tiendas, puestos de comida, atracciones, etc.) y rutas a recorrer, mientras que en una evacuación el conjunto de destinos estará limitado al conjunto de salidas (regulares y de emergencia), y la cantidad de rutas diferentes entre los peatones será menor entre más cerca se encuentren a dichas salidas. El cálculo de la navegación global se realiza al inicio de la simulación y se modifica en casos en que no es posible continuar con la ruta planeada, o cuando se cambia el destino objetivo.

Para calcular las posibles soluciones generalmente se utilizan gráficos de espacio de estado (*state space graph* en inglés) y árboles de búsqueda (*search trees* en inglés) que representan la conectividad de la estructura, como esquinas o puertas en el caso de modelos de espacio continuo, y celdas o posiciones adyacentes en el caso de modelos de espacio discreto. A partir de estos se aplican algoritmos de búsqueda, por ejemplo el algoritmo *Breadth First Search (BFS)* es aplicado en los modelos que simulan principalmente evacuaciones para determinar la distancia desde las salidas hasta cada posición de la estructura, y con esta solución guiar a todos los agentes, usualmente utilizando un campo de dirección como el observado en la Figura 2.5 (Gwizdała, 2015; Huang & Guo, 2008; Nishinari & Kirchner, 2004). Por otro lado el algoritmo *A\** (*A-Star* en inglés) es utilizado para identificar las rutas óptimas de navegación para cada agente utilizando distancias y heurísticas para aumentar su eficiencia (Smith, 2008) lo que resulta más apropiado cuando los destinos son múltiples y varían considerablemente entre los agentes.



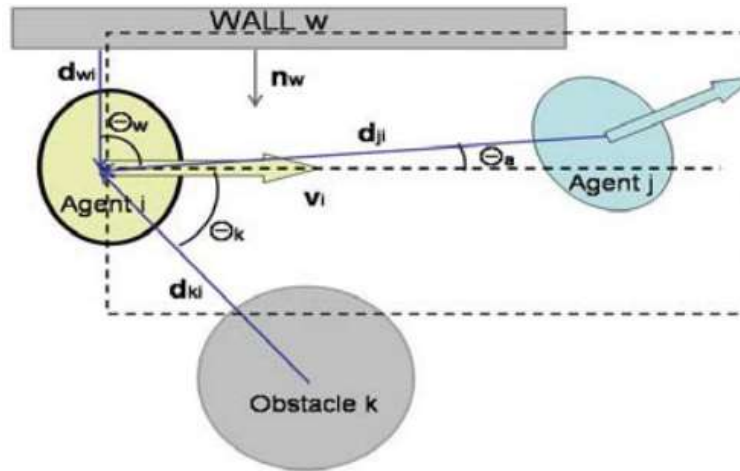


**Figura 2.5:** Campo continuo (izquierda) y discreto (derecha) de dirección o de potencial, de una habitación con cuatro obstáculos y dos salidas, la opacidad es inversamente proporcional a la distancia a la salida. Basado en Nishinari & Kirchner, 2004..

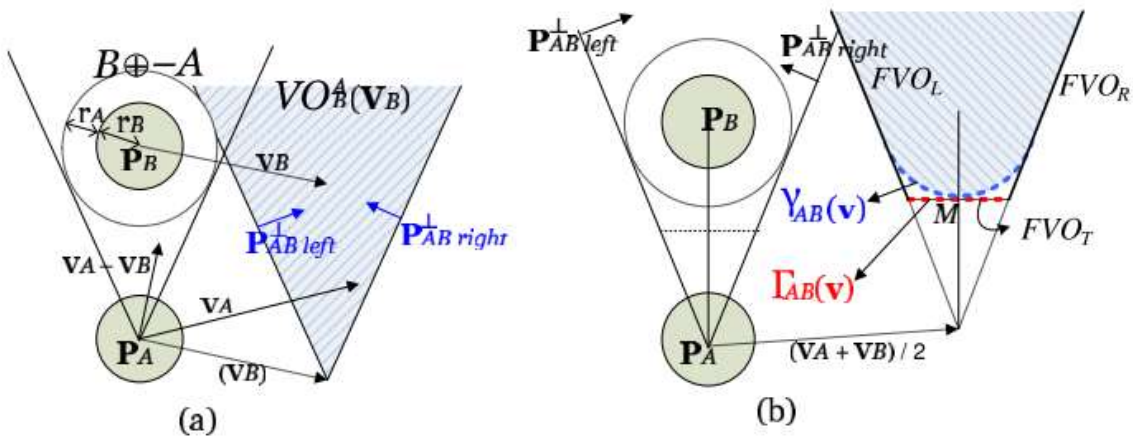
La navegación local en los modelos que usan espacios discretos sigue variaciones de la metodología utilizada en el modelo de autómatas celulares, donde los conflictos entre agentes que buscan ocupar la misma celda es solucionada a partir de una probabilidad de hacerlo, calculada para cada uno de los individuos (Tan et al., 2015), por lo que no se ampliará en esta sección. La navegación local en espacios continuos por otro lado hace uso de las capacidades de percepción del agente y la dirección obtenida en la navegación global para definir y explorar el espacio alcanzable por el agente en el intervalo de tiempo evaluado, identificar las posibles colisiones con los agentes cercanos y deducir el curso óptimo para el futuro cercano (Duives et al., 2014). (Reynolds, 1999) explica una gran cantidad de comportamientos que pueden presentar los agentes y los cálculos para simularlos y aunque su trabajo estaba enfocado principalmente en agentes con dificultad para girar, como aves en vuelo, sus aportes y los de (Olfati-Saber, 2006) sirvieron de punto de partida para muchos otros desarrollos, de los cuales es pertinente mencionar a (N. Pelechano et al., 2007) y a (Chhugani et al., 2009).

El acercamiento de Pelechano es una extensión al modelo de Fuerzas Sociales en el se incluyen reglas de desaceleración y regiones de influencia para mitigar la vibración de los peatones sin incrementar el costo computacional. En la Figura 2.6 se observa un agente de forma ovalada, con el rectángulo de influencia, los vectores y ángulos relativos a obstáculos y otros agentes en diferentes situaciones. Por otro lado (Chhugani et al., 2009) plantea una versión de obstáculos móviles o con velocidad (*Velocity obstacles* en inglés) en la que se calcula un espacio disponible y no disponible para el movimiento de un agente con respecto a la posición, dirección, tamaño y velocidad de los obstáculos

que lo rodean (ver Figura 2.7). La mayor ventaja de este acercamiento es el bajo costo computacional.



**Figura 2.6:** Rectángulo de influencia del agente  $i$  de color amarillo, y las direcciones y ángulos del obstáculo  $k$ , el agente  $j$  y la pared  $w$  con respecto a él. Tomado de N. Pelechano et al., 2007.



**Figura 2.7:** Cálculo del espacio no disponible resultante del movimiento de los agentes  $A$  y  $B$ , a partir de sus radios y direcciones. Tomado de Chhugani et al., 2009.

Existen características de los agentes, como por ejemplo su capacidad de adaptarse, de aprender, o de recordar, que varían de acuerdo a cada modelo y que no son estrictamente necesarias para definir a una entidad como agente. Los aspectos sociales

por ejemplo, han sido incluidos en un gran número de modelos recientemente lo que implica que los agentes tienen vínculos entre sí, tienden a permanecer juntos y a comunicarse entre los miembros de un mismo grupo, dependiendo de las condiciones las interacciones con agentes que no pertenecen al grupo pueden ser de naturaleza colaborativa o competitiva (Almeida et al., 2013). Las decisiones y comportamientos sociales se implementan en general a partir de máquinas de estados finitos (*finite state machines* en inglés) y se consideran de alto nivel por lo que usualmente afectan los procesos de bajo nivel. Se actualizan al iniciar las simulaciones, cuando existen cambios en el entorno o en el agente que requieran definir nuevamente el mejor curso de acción para el agente, o cuando las condiciones psicológicas o fisiológicas del agente así lo indiquen (N. Pelechano et al., 2007).

Adicionalmente existe un tipo de agentes cuyas decisiones se basan en creencias, deseos e intenciones (BDI por las siglas en inglés de Beliefs, Desires and Intentions). En este tipo de agentes las intenciones o acciones están definidas por los deseos u objetivos del agente y sus creencias, que reflejan la percepción (en algunos casos distorsionada) del entorno, los otros agentes y él mismo (Almeida et al., 2013).

El acercamiento por agentes es considerado el más realista para reproducir el fenómeno de las multitudes, pues permite reproducir cada individuo con sus características únicas, como preferencias y psicología, y su relación con los peatones que lo rodean, recreando las interacciones reales entre seres humanos y las decisiones individuales (Almeida et al., 2013; Hajibabai et al., 2007; Treuille et al., 2006). Por otro lado también se identifican algunas desventajas como por ejemplo la reproducción de reglas de comportamiento que reflejen movimientos de manera realista, el costo computacional del cálculo de rutas para cada uno de los agentes en tiempo real, la dificultad en la calibración, reproducción, validación de los resultados del modelo y su fundamento en la teoría (Crooks, Castle, & Batty, 2008; Treuille et al., 2006).

Finalmente, en esta clasificación no se incluyó una categoría de modelos híbridos como lo hace por ejemplo (Duives et al., 2014), dado que se espera que los modelos sean mejorados utilizando las ventajas o asociaciones que puedan adaptarse de otros acercamientos. Para el caso de los modelos basados en agentes estas mejoras se pueden observar en la representación del entorno que algunos modelos utilizan, basándose en las cuadrículas propias del modelo de autómatas celulares, la navegación local o de bajo nivel en espacios continuos que está inspirada en el modelo de fuerzas sociales y de los modelos basados en velocidad (de acuerdo a la clasificación de Duives), y algunas variables ambientales y sociales utilizadas en los modelos basados en comportamiento (Wijermans, Jorna, Jager, Vliet, & Adang, 2013) que son utilizadas en la navegación global o de alto nivel y en la definición de comportamientos sociales.



## 3. Herramientas Computacionales

A partir de los acercamientos expuestos en el capítulo anterior se han desarrollado simuladores que permiten aplicar estos modelos a problemas reales, comparando soluciones frente a los problemas de flujo de las multitudes y resolviendo preguntas de tipo ¿Que tal si ...?. En esta sección se presentan los hallazgos de una breve revisión sobre el estado y las principales características de las diferentes herramientas disponibles.

Esta revisión se hace desde la perspectiva de un usuario con pocos recursos económicos, académicos y tecnológicos que desee evaluar la dinámica de multitudes de un entorno real de pequeñas dimensiones como por ejemplo un jardín de niños, una micro empresa o una vivienda multifamiliar. Se asume que una persona con estas necesidades no cuenta con conocimientos avanzados de programación, de cálculo o con un entendimiento profundo de las causas de las tragedias que suceden en situaciones de pánico en multitudes altamente densas. Del mismo modo se asume que la herramienta debe poder ejecutarse en un equipo de gama media y por lo tanto que su costo debe ser asequible para alguien que no puede costear un computador de gama alta.

### 3.1 Selección de herramientas

La lista de herramientas comparadas se ha generado a partir de las siguientes fuentes:

1. Las respuestas de la encuesta realizada por (Ronchi & Kinsey, 2011), en la que participaron 198 personas de 36 países diferentes, contestando preguntas sobre los programas de simulación de emergencias que más utilizaban, las características que consideraban más importantes y el concepto u opinión que tenían de los resultados.
2. Las herramientas disponibles más mencionadas, citadas o con las características más avanzadas en la literatura consultada. Se hace especial énfasis en su disponibilidad ya que en muchos casos se encontró que las páginas a las que se hace referencia ya no existen.
3. Los resultados principales de la búsqueda “*evacuation simulator software*” en los motores de búsqueda Google y DuckDuckGo. En esta lista se cuentan también aquellos anuncios relevantes que aparecen junto con los resultados orgánicos de la búsqueda.

De la lista resultante se escogieron los 8 resultados más importantes, que se presentan a continuación con su respectivo desarrollador o propietario y la dirección web en la que se consultó su información.

**Tabla 3.1:** Lista de herramientas de simulación, su fuente y su desarrollador o propietario.

HERRAMIENTA	FUENTE	DESARROLLADOR O PROPIETARIO
PATHFINDER	<a href="https://www.thunderheadeng.com/pathfinder/">https://www.thunderheadeng.com/pathfinder/</a>	THUNDERHEAD
Pedestrian Dynamics	<a href="https://www.incontrolsim.com/software/pedestrian-dynamics/">https://www.incontrolsim.com/software/pedestrian-dynamics/</a>	INCONTROL
Pedestrian Simulation Software	<a href="https://www.anylogic.com/airports-stations-shopping-malls/">https://www.anylogic.com/airports-stations-shopping-malls/</a>	ANYLOGIC
LEGION	<a href="https://www.bentley.com/en/products/product-line/building-design-software/legion-simulator">https://www.bentley.com/en/products/product-line/building-design-software/legion-simulator</a>	Bentley
SIMULEX	<a href="https://www.iesve.com/software/ve-for-engineers/module/Simulex/480">https://www.iesve.com/software/ve-for-engineers/module/Simulex/480</a>	Integrated Environmental Solutions Limited
VISWALK	<a href="https://vision-traffic.ptvgroup.com/es/productos/ptv-viswalk/">https://vision-traffic.ptvgroup.com/es/productos/ptv-viswalk/</a>	PTV GROUP
FDS + EVAC	<a href="http://lovreglio.altervista.org/index.htm">http://lovreglio.altervista.org/index.htm</a>	VTT Technical Research Centre of Finland
NETLOGO	<a href="https://ccl.northwestern.edu/netlogo/">https://ccl.northwestern.edu/netlogo/</a>	Northwestern University

Es necesario mencionar que dentro de esta lista también se consideraron los modelos *Clear-Path* de (Chhugani et al., 2009), *HiDAC (High Density Autonomous Crowds)* de (N. Pelechano et al., 2007), y *E-Sim* de (Smith, 2008) por las características de sus acercamientos y el realismo de las simulaciones reportado en la literatura, pero desafortunadamente no se encontró suficiente información para incluirlos dentro de la revisión como opciones viables para el sujeto mencionado anteriormente.

### 3.2 Características revisadas

Considerando que el usuario tendría recursos económicos, tecnológicos y académicos limitados se evalúan las principales características que lo afectarían considerando estas restricciones y el alcance que le daría al software.

En primer lugar se evalúa el aspecto económico, en el que se determina si la herramienta tiene versión de prueba con funcionalidades limitadas, una versión de prueba disponible solo por un periodo de tiempo, si es gratuita o si solo puede accederse a ella a través de un pago.

Aunque las herramientas cuentan con un sistema propio de representación de la infraestructura, se encuentra mucho más conveniente cuando se permite además importar archivos de referencia como archivos CAD, DXF, DWG o incluso imágenes de los planos de la estructura. Para automatizar o facilitar la creación del entorno virtual.

El siguiente factor evaluado es la facilidad de la herramienta para crear escenarios de simulación, es decir el conjunto de obstáculos y conexiones del entorno, las características de la población y las relaciones entre ellos. Esto considerando que el usuario no posee habilidades académicas avanzadas, como conocimiento de cálculo o de programación.

Finalmente se considera necesario revisar si la representación del espacio se hace de forma discreta o continua, ya que por la revisión de la literatura se encontró que una representación discreta limita el realismo de la simulación y de las características del entorno virtual. En este punto solo se hace una revisión del espacio en el que se mueven los agentes ya que pueden utilizarse representaciones discretas con otros propósitos sin afectar la calidad de la simulación, por ejemplo campos de potencial o de dirección, utilizados para influir en la navegación de movimiento de los agentes.

**Tabla 3.2:** Comparación de características de las herramientas de simulación.

HERRAMIENTA	LICENCIA	ARCHIVOS DE REFERENCIA	CREACIÓN DE ESCENARIOS	REPRESENTACIÓN DEL ESPACIO
PATHFINDER	Prueba (30 días)	SI	FÁCIL	CONTINUO
Pedestrian Dynamics	Prueba (14 días)	SI	FÁCIL	CONTINUO
Pedestrian Simulation Software	Prueba (30 días)	SI	FÁCIL	CONTINUO
LEGION	Sin versión de prueba	SI	FÁCIL	CONTINUO

HERRAMIENTA	LICENCIA	ARCHIVOS DE REFERENCIA	CREACIÓN DE ESCENARIOS	REPRESENTACIÓN DEL ESPACIO
SIMULEX	Sin versión de prueba	SI	FÁCIL	CONTINUO
VISWALK	Prueba (30 días)	SI	FÁCIL	CONTINUO
FDS + EVAC	GRATIS	NO	COMPLEJA	CONTINUO
NETLOGO	GRATIS	NO	MEDIA	DISCRETA

De esta comparación se derivan dos conclusiones principales, en primer lugar las herramientas gratuitas no tienen posibilidad de importar archivos de referencia, requieren de conocimientos de programación o un entrenamiento especializado para la configuración de escenarios, especialmente en el caso de FDS + EVAC, que resulta ser el modelo con representación del espacio continuo, y si bien NETLOGO tiene mayor facilidad en la configuración de los escenarios, el espacio es representado de forma discreta. Es decir que los modelos disponibles no son adecuados para el usuario definido.

Por otro lado, las herramientas de pago presentan características bastante completas: todas tienen posibilidad de incluir imágenes o archivos de referencia, la creación y modificación de escenarios se realiza mediante interfaces gráficas y cuentan con representación continua del espacio. Sin embargo, como es de esperarse estas herramientas están diseñadas para ser utilizadas por grandes organizaciones, que requieren un software capaz de simular miles de agentes simultáneamente y que cuentan con recursos suficientes para ello. Un caso especial en este punto es la herramienta VISWALK desarrollada por el PTV GROUP que cuenta con una licencia básica capaz de simular 500 peatones simultáneamente, este alcance reducido puede ser adecuado para el grupo de los usuarios definidos con mayores recursos.



## 4. Planteamiento del problema

El estudio de la dinámica de multitudes ha brindado recomendaciones importantes a lo largo del siglo pasado y actualmente ha definido modelos complejos lo suficientemente realistas como para ser implementados en herramientas comerciales utilizadas en la evaluación de riesgos en entornos con multitudes de gran tamaño, gran densidad y gran complejidad, como estadios, hospitales, edificios de oficinas, aeropuertos entre otros.

El desarrollo, la implementación y ampliación de estos modelos es costosa y se ha enfocado principalmente en las simulaciones de evacuación y flujo normal de peatones para grandes organizaciones, incluyendo funcionalidades de visualización en 3D, simulación de fenómenos como incendios, fugas de sustancias tóxicas y ataques terroristas, elevando aún más el costo de estos programas y dificultando el uso de los modelos desarrollados en aplicaciones comerciales de menor alcance, como microempresas, escuelas, jardines o edificios multifamiliares.

Por lo anterior, se identifica la necesidad de desarrollar un modelo de simulación de evacuaciones basada en los acercamientos que reflejen de mejor manera el fenómeno real, implementar dicho modelo en un software que permita utilizarlo en diferentes escenarios sin necesidad de habilidades académicas avanzadas como conocimiento de cálculo o de programación, y que sea lo suficientemente eficiente para ejecutarlo en un equipo de gama media, reduciendo los costos y riesgos de simulacros, para responder preguntas como:

- ¿Cuál es el tiempo necesario para evacuar el edificio?
- ¿Donde se presentan cuellos de botella o situaciones peligrosas para los peatones durante la evacuación del edificio?
- Comparando múltiples configuraciones, ¿Cual presenta un mayor flujo de personas?, ¿Cuál es la mas segura?.

De acuerdo con la cantidad relativamente pequeña de peatones, y las respuestas que se desea resolver se considera que el modelo debe ser de tipo microscópico y basado en agentes (Almeida et al., 2013; Duives et al., 2014; Helbing et al., 2005; Helbing & Johansson, 2013; Manley, 2012; N. Pelechano et al., 2007), es decir que tenga en cuenta las interacciones entre los individuos de la multitud, considerando principalmente aquellos basados en agentes por su flexibilidad en la simulación de diferentes escenarios sin la necesidad de ser calibrados nuevamente en cada entorno.

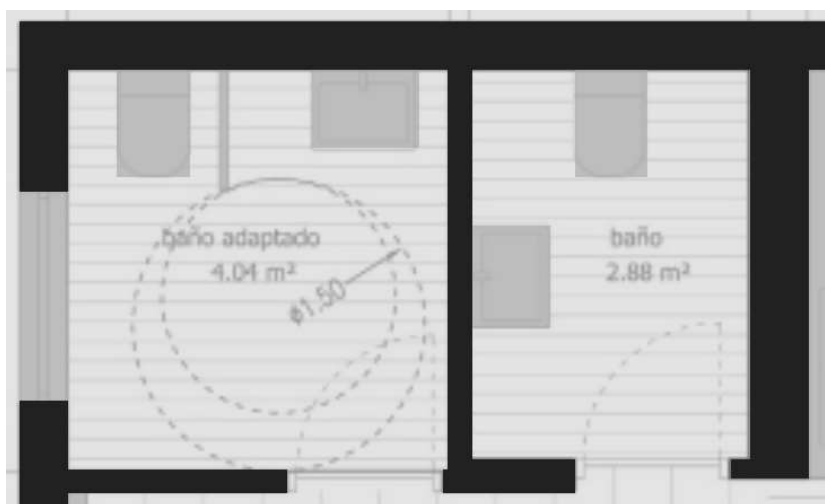


## 5. Descripción del modelo propuesto

En este capítulo se presenta la descripción del modelo microscópico basado en agentes que se propone como solución al problema descrito en la sección anterior. Dicho modelo permite la simulación de evacuaciones de poblaciones heterogéneas y la evaluación cualitativa y cuantitativa de cambios en la infraestructura.

### 5.1 Representación de la estructura

La estructura es representada de forma bidimensional desde una vista superior, reflejando la disposición de muros, obstáculos y salidas del mismo modo que lo hacen los planos arquitectónicos del espacio. Los muros y obstáculos son representados como cuadriláteros cuyo tamaño, posición, rotación y color son especificados por el usuario, por otro lado, las salidas son representadas como círculos en los que el usuario define su tamaño, posición y color. Con el fin de facilitar al usuario la tarea de definir a posición y tamaño de los muros, obstáculos y salidas de la estructura, estas características deben ajustarse a una rejilla cuyo tamaño predefinido es de 2.5 cm (este parámetro puede ser ajustado por el usuario), esta característica no afecta la posición ni el movimiento de los agentes, es decir que el modelo sigue siendo continuo.



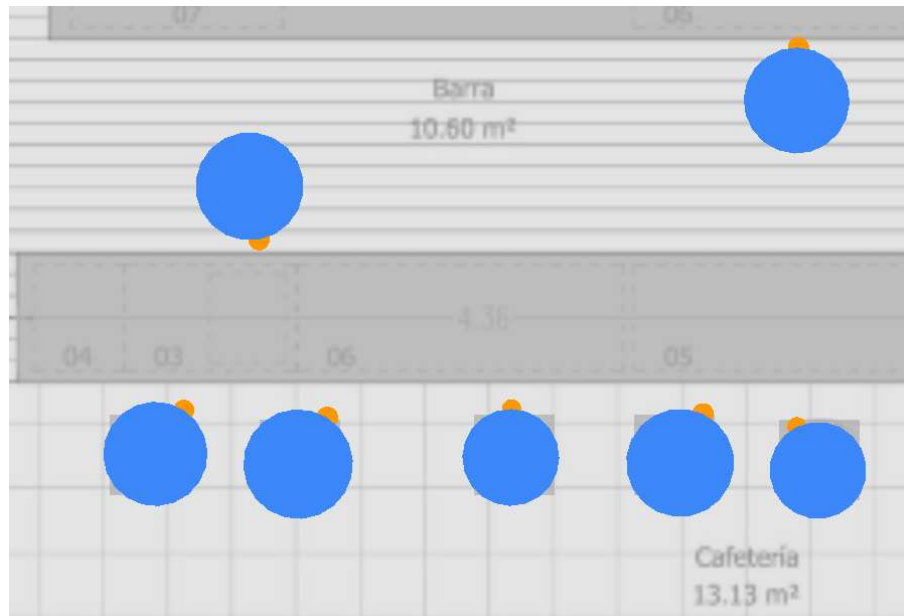
**Figura 5.1:** Representación de dos baños contiguos, los muros están en negro y los obstáculos en gris. Creación propia.

La diferenciación entre muros y obstáculos se refiere principalmente a su altura, siendo los elementos altos como paredes, columnas y estanterías representados más apropiadamente como muros, y los elementos bajos como mesas, sillas, o muros bajos representados como obstáculos. Esta diferencia es importante dadas las interacciones que tienen los agentes con ellos, pues a diferencia de los muros, los obstáculos permiten identificar las salidas a través de ellos, y un pequeño nivel de intersección en los movimientos, por ejemplo si existe una mesa entre la salida y el peatón, este aún puede identificar hacia donde debe moverse, y si al dirigirse a ella es empujado por otro agente, puede recostarse ligeramente sobre la mesa, ver la Figura 5.1. para un ejemplo de esta representación.

## 5.2 Representación de los peatones

Los peatones son representados como dos círculos, el primero representa su cuerpo por lo que su diámetro indica la distancia entre los hombros. Mientras que el otro únicamente indica la dirección hacia donde está mirando (ver Figura 5.2.). El modelo considera los siguientes parámetros en la creación de los agentes:

- **Edad:** Se tienen las categorías “Niño”, “Adulto” y “Adulto Mayor”, y para cada una existe un tamaño mínimo y máximo, la velocidad en estado de calma y la velocidad máxima, todos estos parámetros pueden ser definidos por el usuario. Al momento de generar los agentes, el tamaño de los mismos será un valor aleatorio entre el tamaño mínimo y máximo definido para la edad seleccionada.
- **Conocimiento del Entorno:** Este parámetro puede ser “Bajo” o “Alto” y determina la salida escogida por el agente. Los agentes con un conocimiento bajo seleccionarán la salida más rápida entre aquellas que estén a la vista desde su posición inicial y la salida principal, mientras que los agentes con conocimiento alto seleccionarán la salida más rápida aún si no pueden verla.
- **Nivel de entrenamiento:** Se refiere a la capacidad de los peatones para reaccionar rápidamente y en calma a situaciones de emergencia. Este parámetro puede tener valores de “Bajo” o “Alto” y se relaciona también con los parámetros de tiempo de reacción inicial mínimo, tiempo de reacción inicial máximo, “factor de tiempo esperado para no entrenados” y “factor de tiempo esperado para entrenados”. Los peatones con entrenamiento alto tendrán un tiempo de reacción al inicio de la simulación seleccionado aleatoriamente entre el valor de tiempo de reacción mínimo y el valor medio entre el valor de tiempo de reacción mínimo y el valor de tiempo de reacción máximo. Los peatones con entrenamiento bajo tendrán un tiempo de reacción entre ese valor medio y el tiempo máximo de reacción. Por otro lado el peatón tiene un tiempo esperado de llegada al destino, determinado como a distancia hasta el destino dividido entre la velocidad en estado de calma, y multiplicado por el factor de tiempo estimado para entrenados y no entrenados dependiendo del caso.



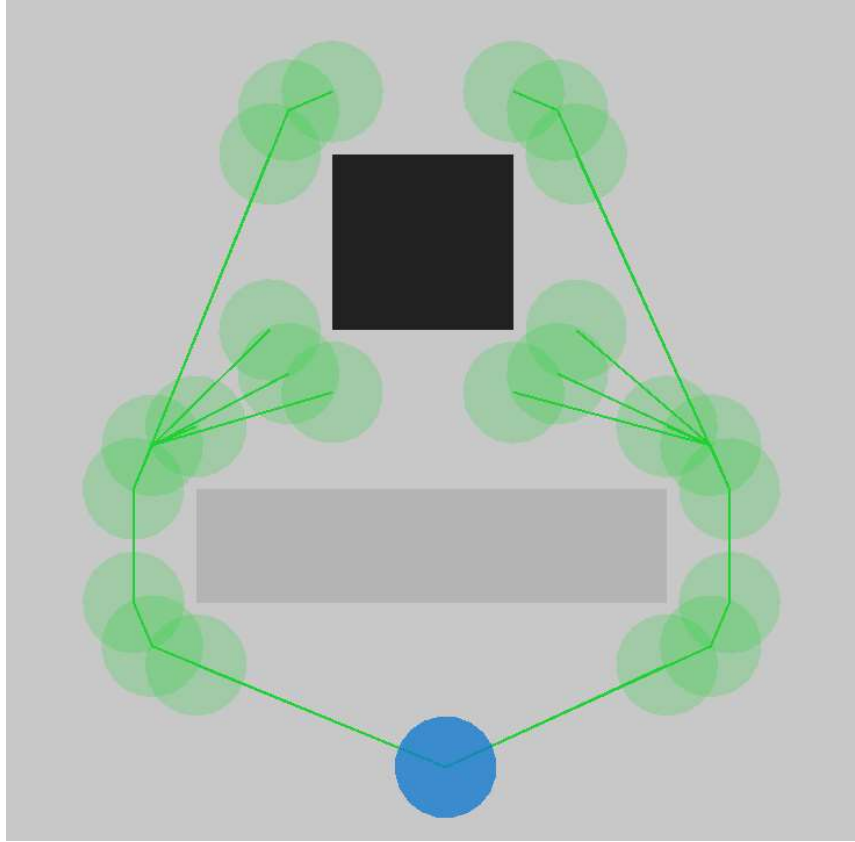
**Figura 5.2:** Representación de 5 clientes sentados a un costado de una barra de cafetería y dos empleados al lado opuesto. Creación propia.

### 5.3 Navegación de los peatones

El movimiento de alto nivel de los agentes está definido por una red de puntos guía ubicados a cierta distancia de los vértices de los cuadriláteros que representan los muros y los obstáculos, con la que es posible conocer la ruta desde cualquier punto de la estructura hasta cualquiera de las salidas. Esta red se crea siguiendo los siguientes pasos:

1. Creación de 3 puntos guía por cada vértice en los cuadriláteros que representan los muros y obstáculos. El tamaño de estos puntos guía debe ser cercano al tamaño promedio de los peatones de la población, y la distancia debe ser cercano a la diferencia entre el tamaño máximo de los peatones y el tamaño escogido para los puntos guía (ver Figura 5.3.).
2. Se eliminan los puntos guía que poseen intersecciones con muros u obstáculos
3. Para cada punto guía se crea una lista que contiene el siguiente punto guía y la distancia hasta él, el tamaño de esta lista es igual a la cantidad de salidas en la estructura.
4. Las listas creadas en el punto anterior se llenan con la información del algoritmo BFS, tomando como origen cada salida, y como posibles nodos conectados únicamente los puntos guía a los que se puede llegar sin atravesar ningún muro u obstáculo.

5. Se eliminan los puntos guía que no se incluyeron en el algoritmo del punto anterior.



**Figura 5.3:** Representación de la red de navegación (en verde) generada alrededor de un muro cuadrado y un obstáculo rectangular, hacia un destino circular. Creación propia.

Al iniciar la simulación los agentes determinan la salida por la que desean evacuar considerando su conocimiento del entorno y las salidas que tienen a la vista, luego determinan el punto guía más cercano al que pueden llegar sin atravesar ningún obstáculo, si no existe ninguno que cumpla esta restricción se escoge el más cercano aún cuando sea necesario atravesar un obstáculo. Se determina la distancia entre el peatón y el punto guía seleccionado, luego la distancia entre este punto guía y la salida seleccionada y finalmente el tiempo esperado de llegada a dicha salida, considerando la velocidad de movimiento en estado de calma y el factor de tiempo esperado.

El movimiento del agente solo inicia cuando ha transcurrido el tiempo de reacción inicial asignado para él, o cuando es incitado por otro agente para que comience a evacuar, moviéndose hacia el primer punto guía y cuando llegue a él determinando cual es el

siguiente punto guía en la ruta y continuando así hasta llegar a la salida seleccionada, cuando se desactivará.

El movimiento de bajo nivel o movimiento local de los peatones está determinado por varias reglas sencillas:

- Los agentes no pueden atravesarse o presentar intersecciones entre ellos.
- Cuando dos o más agentes estén en contacto cambiarán su dirección de movimiento hacia la derecha o izquierda dependiendo del parámetro definido en la simulación siempre que el ángulo entre la dirección de los agentes sea mayor a 120 grados, es decir que este comportamiento solo se activará si los agentes se dirigen hacia el otro, y no si ambos se dirigen en una dirección similar.
- La velocidad deseada de movimiento se calculará en cada instante como la necesaria para llegar a la salida en el tiempo esperado (que se definió al inicio de la simulación). Esta velocidad no puede ser mayor a la velocidad máxima definida para los agentes de dicha edad y no necesariamente es igual a la velocidad que refleje el agente, por ejemplo ante un cuello de botella, la velocidad deseada de los agentes aumentará aun cuando no se muevan en lo absoluto, esto permite simular incrementos en la presión de la multitud, nerviosismo y empujones.

El nerviosismo del agente es un número entre cero y uno que refleja el punto de la velocidad deseada en el rango entre la velocidad en calma (cero) y la velocidad máxima (uno).

## 5.4 Representación de resultados

El modelo permite la visualización de la evacuación en tiempo real lo que permite identificar los puntos donde se presenten cuellos de botella o flujos bidireccionales, y la exportación en archivos .csv (comma separated values) de las variables que posee cada uno de los agentes en intervalos definidos por el usuario. Estos archivos pueden ser procesados por programas como Microsoft Office Excel o LibreOffice Calc lo que facilita su interpretación y análisis.

Las información incluida en los archivos exportados son las siguientes:

- Ubicación en el equipo local del escenario utilizado en la simulación.
- Fecha y hora de la simulación
- Para cada agente
  - Identificación del agente
  - Categoría de edad
  - Categoría de entrenamiento
  - Categoría de conocimiento del espacio
  - Tiempo transcurrido desde el inicio de la simulación
  - Si el estado del agente es "Sin Moverse", es decir si no ha terminado su tiempo de reacción inicial y no ha sido incitado a evacuar por otro agente. Cero (0) para falso y uno (1) para verdadero.

- Si el estado del agente es “Evacuando”, es decir si el agente ya se encuentra en movimiento pero no ha llegado a la salida seleccionada. Cero (0) para falso y uno (1) para verdadero.
- Si el estado del agente es “Evacuado”, es decir si el agente ya llegó a la salida seleccionada. Cero (0) para falso y uno (1) para verdadero.
- Posición X.  
Posición Y.
- Salida escogida: Identificación de la salida escogida. La salida principal se identifica como “Destination\_00”
- Distancia recorrida.
- Distancia por recorrer.
- Factor de nerviosismo.
- Velocidad deseada.

## 5.5 Calibración y validación

La herramienta cuenta con parámetros predefinidos para la interfaz, el cálculo de red de navegación, la generación de agentes y la exportación de resultados, sin embargo se recomienda al usuario determinar los parámetros que se ajustan a su población a través del archivo de configuración de preferencias, ya que como se expuso en capítulos anteriores la dinámica de multitudes varía considerablemente dependiendo de las características propias de la población. Los parámetros que se encuentran de forma predeterminada en la herramienta se determinaron por medio de videos del movimiento de los estudiantes, maestros y trabajadores de la Universidad Nacional de Colombia que se encontraban en las cercanías del edificio de ingeniería 401, en las horas de la mañana entre el 10 y el 12 de Julio de 2019.

## 5.6 Herramienta desarrollada

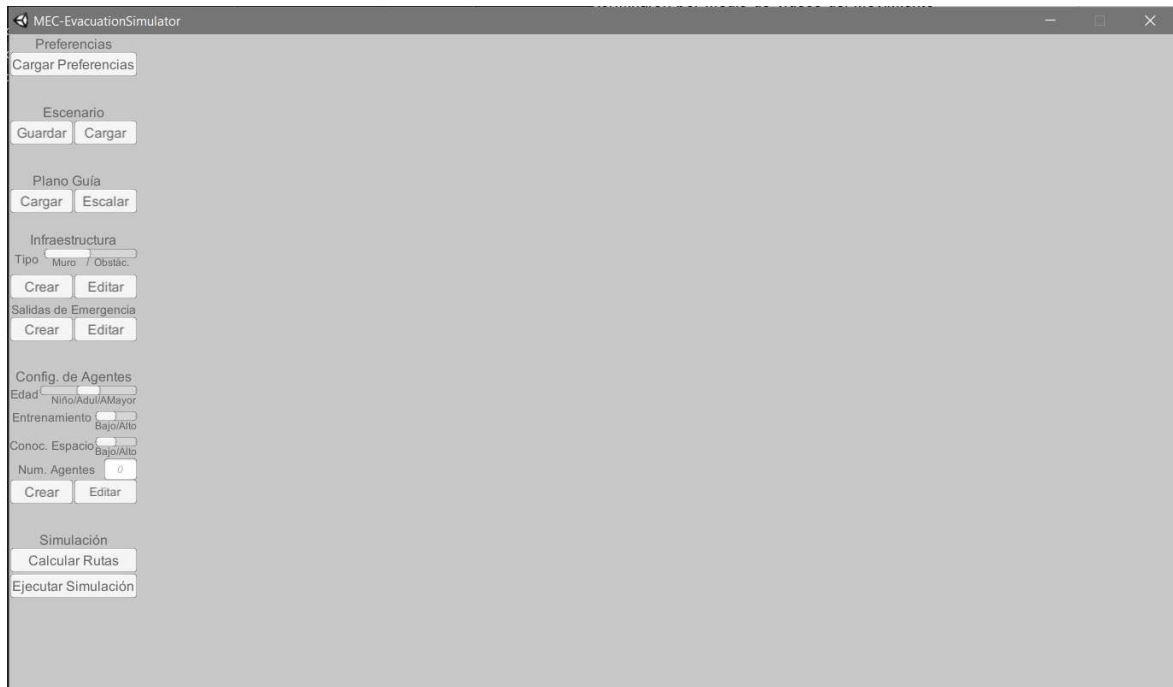
Dado que el propósito del trabajo no es únicamente la generación de un modelo, sino también de una herramienta que permita a su uso se ha desarrollado un software que permite la configuración de parámetros del modelo, estructura (muros, obstáculos y salidas) y los peatones que se simularán, al igual que su edición para revisar alternativas, una opción de guardado y carga de estas configuraciones y finalmente la opción de exportar los resultados de la simulación.

Esta herramienta al igual que su manual de usuario se encuentran disponibles de forma gratuita en las direcciones electrónicas:

- [https://github.com/mecamargob/MEC\\_EvacuationSimulator](https://github.com/mecamargob/MEC_EvacuationSimulator)
- [https://drive.google.com/open?id=1cNK7UAiG\\_-Zpd5p2UInDhsZeb\\_Zjy21O](https://drive.google.com/open?id=1cNK7UAiG_-Zpd5p2UInDhsZeb_Zjy21O)

Este manual también se encuentra en el Anexo A de este documento.





**Figura 5.4:** Vista de la herramienta de simulación generada. Creación propia.

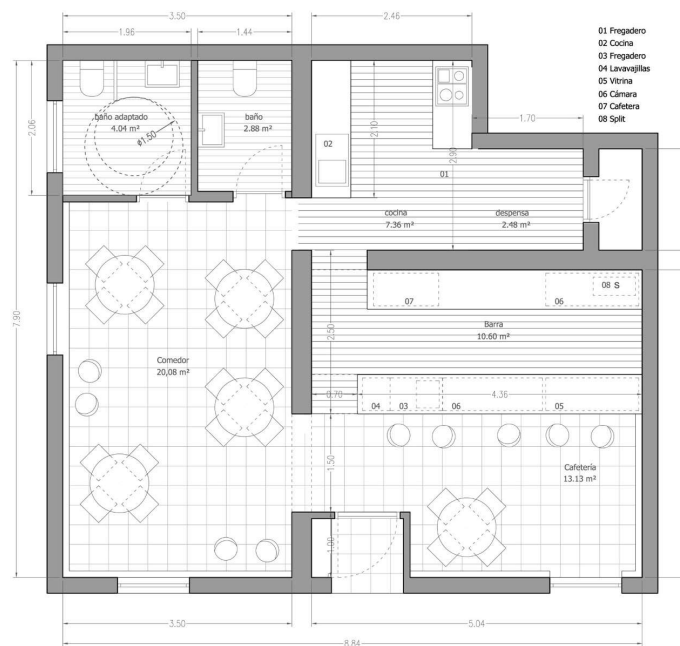


## 6. Experimentación y resultados

En esta sección se muestran las generalidades del uso de la herramienta, los resultados de las simulaciones y las recomendaciones para mejorar la evacuación de un edificio.

### 6.1 Caso de estudio

Para el caso de estudio se escogió un plano de una cafetería con capacidad para 29 clientes y 7 empleados, como se muestra en la Figura 6.1. La cafetería cuenta con un acceso por la parte inferior y ventanas en el muro inferior y el muro izquierdo, dos baños y una cocina contra el muro superior y un mostrador desde el muro derecho al centro del establecimiento. El espacio para clientes está dividido entre 5 mesas con capacidad para 4 personas cada una y 9 sillas individuales, 5 de ellas ubicadas frente al mostrador y las 4 restantes sobre los muros inferior e izquierdo.



**Figura 6.1:** Plano de cafetería. Extraído de [http://1.bp.blogspot.com/-j\\_PAhj6eAKk/UatV0uJf-bl/AAAAAAAAAU8/YdhhYa8H22g/s1600/plano+cafeteria.jpg](http://1.bp.blogspot.com/-j_PAhj6eAKk/UatV0uJf-bl/AAAAAAAAAU8/YdhhYa8H22g/s1600/plano+cafeteria.jpg)

Considerando el espacio se determina que la totalidad de la población será de edad adulta, con un cliente ocupando uno de los baños y todos los demás en sus sillas, dos empleados en la cocina, dos en el mostrador, dos actuando de meseros junto a las mesas y el último en el baño restante. Se asume adicionalmente que los empleados tienen un conocimiento alto del espacio y que además han sido entrenados en el manejo de emergencias, mientras que los empleados no poseen ninguna de estas características.

Se busca determinar el tiempo de evacuación de la cafetería considerando la disposición de muebles actual, las zonas donde se presentan problemas como cuellos de botella (reducción de la velocidad local) o aglomeración (aumento en la densidad local), proponer cambios para mitigar dichos problemas y determinar cualitativa y cuantitativamente el cambio que tienen estas propuestas sobre la evacuación.

## 6.2 Evaluación de situación inicial

Aprovechando la funcionalidad de la herramienta en la que se pueden cargar imágenes del equipo local y de la web, no fue necesario descargar la imagen del plano para tomarla como referencia para la ubicación de muros, obstáculos y salidas. Objetos circulares como las mesas y las sillas individuales fueron representados de manera abstracta como cuadriláteros de tamaño similar, en el caso de las mesas el contorno final es bastante cercano al indicado en los planos debido a la presencia de sillas, en la Figura 6.2. puede observarse el resultado de la representación de la infraestructura, en la que los muros se pueden observar de color negro, los obstáculos de color gris y la única salida como un círculo de color azul.



**Figura 6.2:** Representación de la cafetería en la herramienta. Creación propia.



**Figura 6.3:** Representación de los agentes en la herramienta. Creación propia.

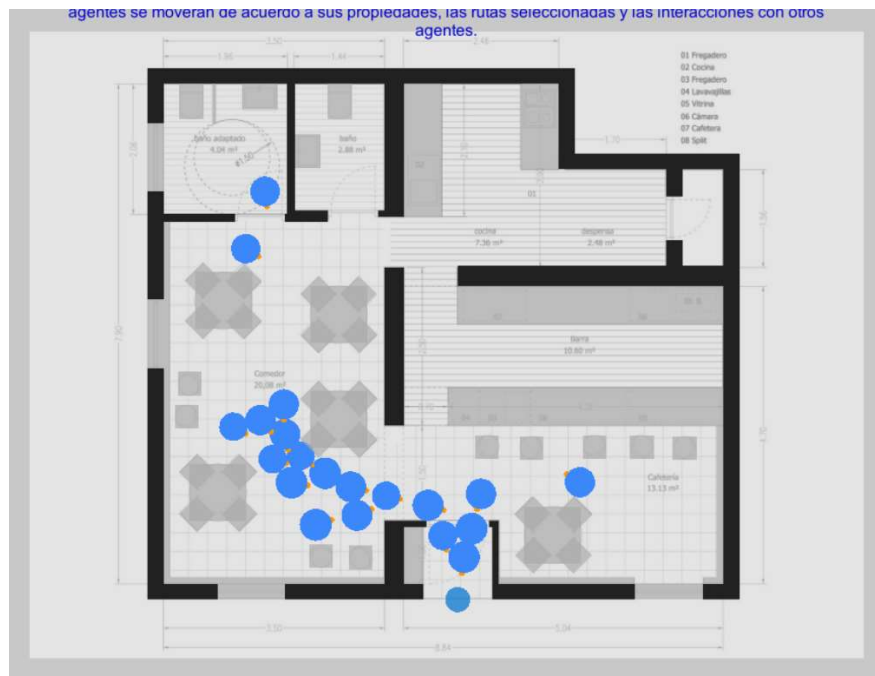
En la Figura 6.3. se puede apreciar además la ubicación de los agentes en el espacio, se puede observar que los agentes que representan los clientes en las mesas están sobre los cuadriláteros que representan las sillas y mesas, esto generará una demora adicional que simulará el tiempo adicional que tarden en tomar las cosas, y levantarse.

Al generar la red de navegación (ver Figura 6.4.) se observa que la parte izquierda de la cafetería, en la que se encuentran la mayoría de las mesas solo hay un pequeño espacio por el que tendrán que pasar todos los clientes que intenten evacuar desde esa zona. También se puede observar que se han creado nodos encima del muro superior, sin embargo esos puntos de guía no son utilizados por ningún agente.

Al ejecutar la simulación se observan entre los fenómenos cualitativos que mientras que la cocina, el mostrador y la parte derecha de la cafetería son evacuadas rápidamente, la parte izquierda presenta congestión y un cuello de botella entre las dos mesas más cercanas a la puerta (ver Figura 6.5.). También es evidente que la ruta de evacuación usada por los empleados no tiene casi contacto con los clientes por lo que estos no son influenciados a empezar a evacuar y dependen únicamente del tiempo de reacción inicial que se les asignó al inicio de la simulación.

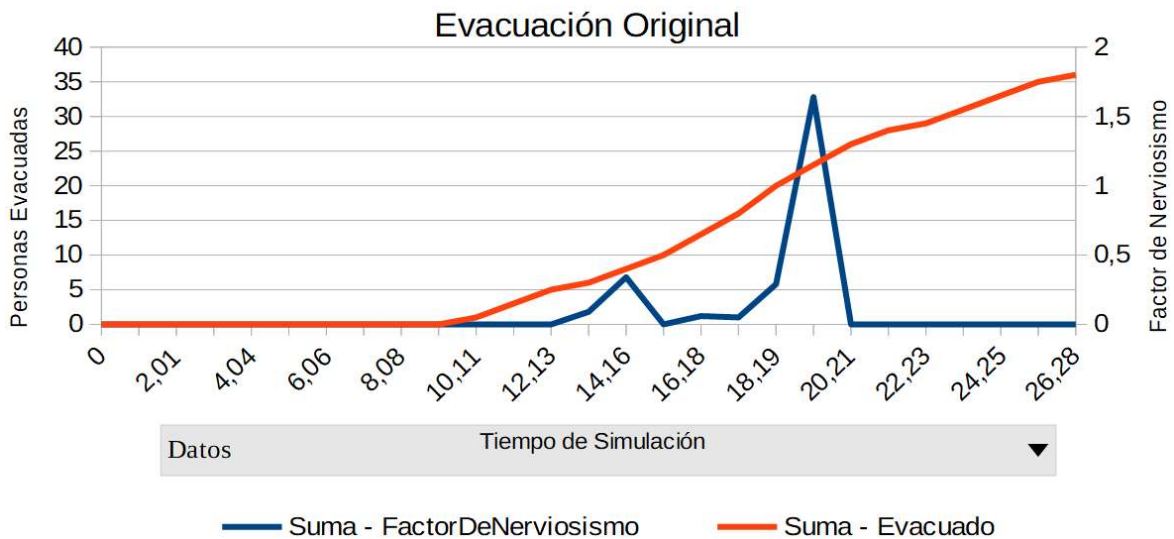


**Figura 6.4:** Representación de la red de navegación (en verde). Creación Propia.



**Figura 6.5:** Captura de la simulación, se observa que la sección izquierda de la cafetería tarda mucho más en evacuar. Creación propia.

Cuantitativamente se observa en la Figura 6.6. que la primera persona evacuada sale de la cafetería en el segundo 10, el 25% de las personas ha evacuado en el segundo 15, el 50% en el segundo 18, el 75% en el segundo 21 y la última persona termina de evacuar el edificio en el segundo 26. Adicionalmente se observan dos picos de pánico, el primero corresponde al leve cuello de botella que se presenta al evacuar los clientes y los trabajadores del lado derecho de la cafetería. El segundo, más pronunciado y peligroso ocurre por el cuello de botella de los clientes ubicados en las mesas del lado izquierdo.



**Figura 6.6:** Personas Evacuadas y Factor de nerviosismo en el escenario original. Creación propia.

Finalmente se identifica que en promedio los agentes tienen que recorrer 5.56 metros para evacuar el espacio, con una mediana de 5.76 metros y una desviación estándar de 1.68 metros (ver Figura 6.7.).



**Figura 6.7:** Distribución de la distancia inicial a la salida. Creación propia.

### 6.3 Cambios propuestos

Ante los problemas identificados en la configuración original se plantean algunos cambios a la posición de algunas mesas, sillas, y la creación de una salida de emergencia adicional con el fin de mejorar los tiempos de evacuación, principalmente de los clientes ubicados en la parte izquierda de la cafetería, adicionalmente en la Figura 6.8. se observa que el personal de la cocina ahora tiene una salida más cercana, que pasa cerca a los clientes del costado izquierdo. A continuación el detalle de dichos cambios:

- Creación de una salida de emergencia en el lugar de la ventana del muro izquierdo.
- Movimiento de las dos sillas individuales ubicadas en el lado izquierdo de la salida principal, sobre el muro inferior, para ubicarlas en la esquina inferior derecha, espacio que se encuentra vacío en la configuración inicial.
- Reubicación de las dos mesas centrales del costado izquierdo para ocupar el espacio liberado por las sillas mencionadas en el punto anterior y la mitad del muro central.
- Rotar 45 grados la mesa ubicada en la parte superior izquierda y moverla ligeramente hacia el centro de la cafetería de modo que se permita un flujo adicional entre la mesa y la pared izquierda.

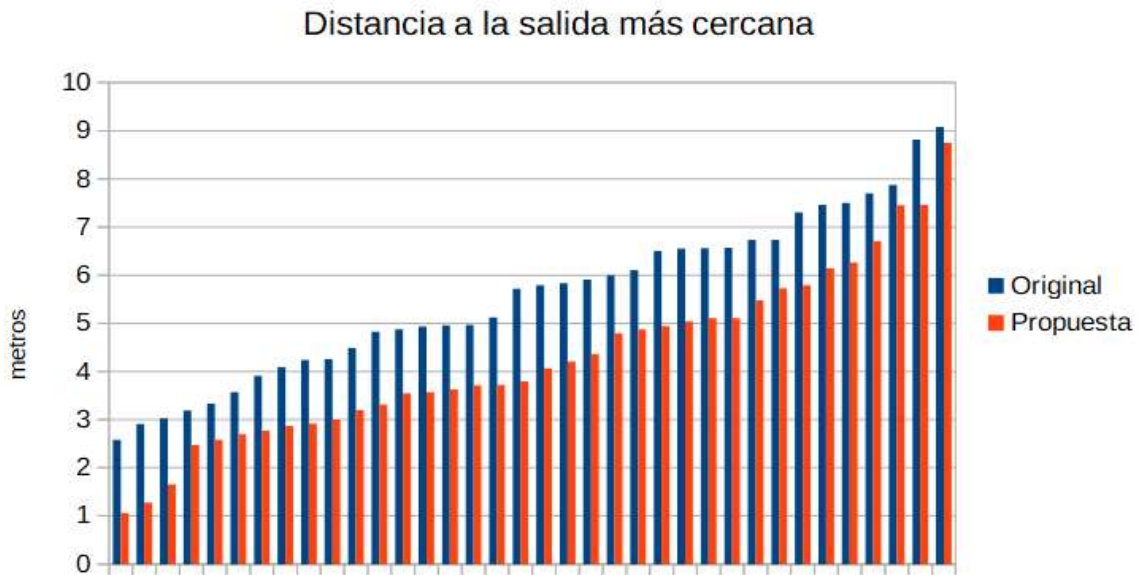


**Figura 6.8:** Representación de la red de navegación de la cafetería con la configuración propuesta, se observa una salida adicional sobre el muro izquierdo. Creación Propia.

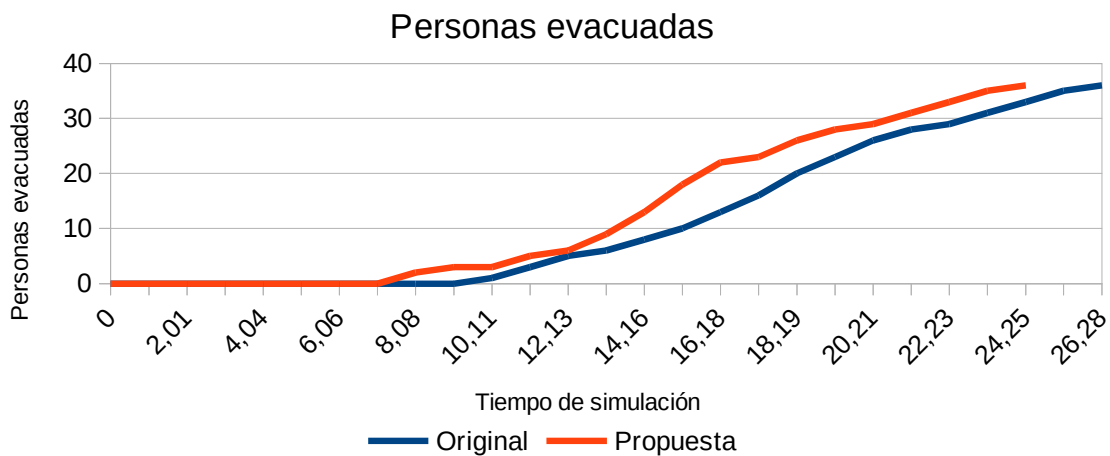


## 6.4 Resultados obtenidos

Los resultados de la simulación con la configuración propuesta muestran que 16 peatones utilizan la nueva salida mientras que 20 siguen utilizando la salida principal, también, la distancia inicial promedio hasta la salida más cercana pasó de 5.56 metros a 4.28 lo que representa una reducción del 23%, y la mediana se redujo de 5.76 metros a 3.93 metros, es decir una reducción del 31.7%. En la Figura 6.9. se ve la comparación entre las distribuciones de los dos escenarios.



**Figura 6.9:** Comparación de la distribución de la distancia inicial. Creación propia.

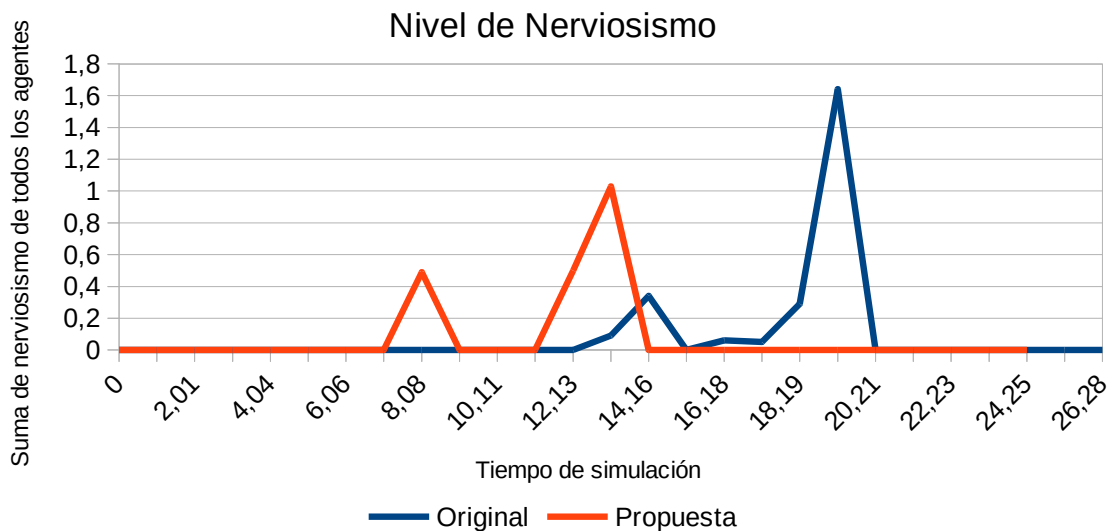


**Figura 6.10:** Comparación de cantidad de personas evacuadas. Creación propia.

En la Figura 6.10 se puede apreciar que la evacuación con la configuración propuesta inicia y termina antes que en la configuración original. En la tabla 6.1 se puede apreciar las diferencias de tiempos para diferentes proporciones de la población.

**Tabla 6.1:** Comparación en velocidad de evacuación (segundos)

% Población evacuada	Config. Original	Config. Propuesta	Variación
1ra persona evacuada	10.11	8.08	-20.1%
25%	15.17	13.16	-13.2%
50%	18.19	15.17	-16.6%
75%	21.21	19.02	-10.3%
100%	26.28	24.25	-7.7%



**Figura 6.11:** Comparación de Nivel de nerviosismo total. Creación propia.

El nivel de nerviosismo de los agentes también es menor en la configuración propuesta, como se ve en la Figura 6.11. se siguen presentando dos picos, pero el valor máximo es 37% más bajo. Por otro lado el valor total de nerviosismo durante toda la evacuación pasa de ser 2.47 en el escenario original a 2.02 en el escenario modificado, es decir un 18% inferior.

## 6.5 Experiencia con la herramienta

La evaluación del caso de estudio planteado en la primera parte de este capítulo y los cambios propuestos para mejorar los tiempos y condiciones de su evacuación permitieron hacer una prueba del rendimiento y funcionalidad de la herramienta. El resultado en términos de facilidad de uso y velocidad de procesamiento fue bastante satisfactorio pues antes de 30 minutos de haber iniciado ya se contaba con conclusiones cualitativas y cuantitativas de la evacuación del espacio con la configuración original, siendo la etapa más larga la referente al análisis de la información exportada. Las diferentes etapas del proceso y su duración se pueden apreciar en la siguiente tabla.

**Tabla 6.2:** Actividades en la evaluación de la configuración original y su duración.

ACTIVIDAD	DURACIÓN (minutos)
Carga de la imagen de referencia	0.1
Representación de estructura (muros, obstáculos y salidas)	5
Representación de los agentes	5
Creación de red de navegación	0.1
Definición de archivo de exportación	0.2
Ejecución de la simulación	0.7
Análisis de la información exportada	16

Por otro lado el programa se probó en un equipo Asus N56JR de procesador intel i7 – 4700 y en un Lenovo ideapad 330S-15ARR con procesador AMD RYZEN 5 2500U, presentando un consumo promedio de procesador entre 0% y 2%, y de memoria entre 100 y 115 MB, es decir, un consumo mínimo durante los procesos de creación y edición, tanto de infraestructura como de agentes, al igual que durante el calculo de la red de navegación pero tras la ejecución de la simulación el consumo de procesador empieza a subir y tarda en liberarse aún después de terminar, por lo que es aconsejable guardar los escenarios creados, antes de dicha ejecución y cerrar el programa en cuanto se termina la simulación.

En general el trabajo en la herramienta fue bastante fluido y efectivo, los datos generados permiten una gran variedad de análisis, y la funcionalidad de guardar, cargar y editar escenarios permite la evaluación de múltiples soluciones de forma rápida.



## 7. Conclusiones y recomendaciones

### 7.1 Conclusiones

El estudio de la dinámica de multitudes ha sido abordado de forma multidisciplinaria y con enfoques bastante variados desde mediados del siglo pasado, generando diferentes paradigmas sobre la naturaleza del comportamiento de las multitudes, especialmente del pánico y las causas de accidentes en situaciones de alta aglomeración.

Actualmente se han identificado las ventajas de los modelos que tienen en cuenta las interacciones locales entre peatones sobre aquellos que asumen la multitud como una entidad única o uniforme, de modelos que representan el espacio de forma continua frente a los discretos, y de los modelos basados en agentes frente a los otros enfoques.

El uso de estos modelos permite la reducción en costos de simulacros y la evaluación de seguridad en entornos arquitectónicos desde la fase de diseño, sin embargo las herramientas disponibles actualmente presentan barreras de tipo económico y académico para usuarios con necesidades de alcance pequeño y mediano. Ante esta situación se ha desarrollado un modelo microscópico basado en agentes cuyo consumo de recursos computacionales es lo suficientemente bajo para ser usado en equipos de gama media y baja; se ha generado la documentación necesaria para ser utilizado por personas sin conocimientos profundos de dinámicas de multitudes; y se encuentra disponible de forma gratuita en las direcciones web:

- [https://github.com/mecamargob/MEC\\_EvacuationSimulator](https://github.com/mecamargob/MEC_EvacuationSimulator)
- [https://drive.google.com/drive/folders/1cNK7UAiG\\_-Zpd5p2UlnDhsZeb\\_Zjy21O](https://drive.google.com/drive/folders/1cNK7UAiG_-Zpd5p2UlnDhsZeb_Zjy21O)

Siguiendo los hallazgos de múltiples investigadores se ha incluido la opción de que los parámetros de este modelo puedan ser configurados por el usuario para ajustarse a la población, espacio y características particulares del entorno que desea evaluar, adicionalmente la simulación puede visualizarse en tiempo real y los datos de la misma pueden ser exportados para hacer comparaciones cuantitativas entre escenarios.

Esta herramienta fue utilizada para evaluar el desempeño de la evacuación de una cafetería de una planta, identificar problemas, proponer soluciones y cuantificar la mejora al aplicarlas al entorno.

## 7.2 Recomendaciones

A pesar de que el modelo y la herramienta presentan una solución a la problemática identificada, durante la evaluación del caso de estudio se identificaron algunas expansiones del modelo que podrían desarrollarse en investigaciones futuras y que aumentarían el realismo de la simulación:

- No se cuenta con la posibilidad de incluir escaleras o elevadores para evaluar simultáneamente varios niveles de un edificio.
- La interacción social de los agentes podría ampliarse para incluir comunicación entre ellos y acciones de propagación de pánico y calma.
- Sería conveniente incluir también la posibilidad de que los agentes resulten heridos en situaciones de alta densidad, pánico o variación de las velocidades locales.
- La forma de los agentes podría cambiarse para ajustarse más a la forma real de los peatones e incluir agentes con formas inusuales, como personas con equipaje o en sillas de ruedas.

Con respecto a la herramienta se tienen las siguientes funcionalidades que mejorarían el flujo de trabajo.

- Una función de copiar y pegar muros, agentes y salidas facilitaría aún más varias tareas repetitivas.
- Sería conveniente también manejar rutas fijas para los archivos de escenarios, preferencia y datos exportados, o una funcionalidad para administrarlos sin salir de la herramienta.
- Podría incluirse una funcionalidad para que los agentes de diferente tipo o de diferentes características tengan colores o identificadores claros durante la simulación.

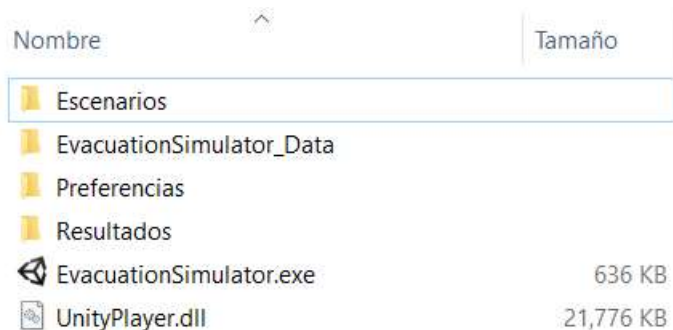
## Anexo A. Manual de usuario

La herramienta permite simular evacuaciones de espacios y poblaciones definidas por el usuario, se ha probado tanto en procesadores intel como AMD y está diseñado para trabajar en el sistema operativo Windows.

La herramienta se encuentra en una carpeta comprimida de nombre "EvacuationSimulator.zip", disponible de forma gratuita en las direcciones

- [https://github.com/mecamargob/MEC\\_EvacuationSimulator](https://github.com/mecamargob/MEC_EvacuationSimulator)
- [https://drive.google.com/drive/folders/1cNK7UAiG\\_-Zpd5p2UlnDhsZeb\\_Zjy21O](https://drive.google.com/drive/folders/1cNK7UAiG_-Zpd5p2UlnDhsZeb_Zjy21O)

Una vez el archivo "EvacuationSimulator.zip" ha sido descargado y descomprimido se tiene el siguiente contenido



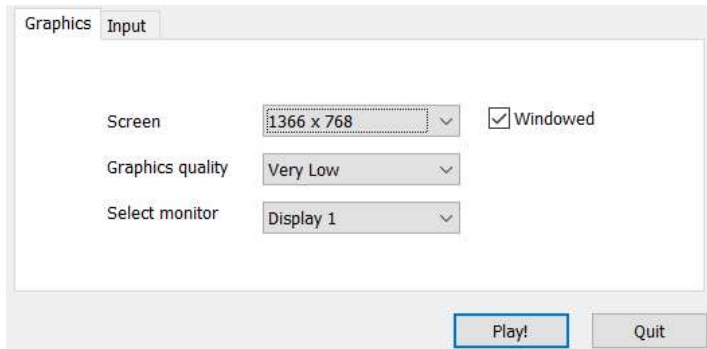
Nombre	Tamaño
Escenarios	
EvacuationSimulator_Data	
Preferencias	
Resultados	
EvacuationSimulator.exe	636 KB
UnityPlayer.dll	21,776 KB

Los archivos EvacuationSimulator.exe, UnityPlayer.dll y la carpeta EvacuationSimulator\_Data no deben ser borrados ni reubicados, por otro lado las carpetas Escenarios, Preferencias y Resultados contienen ejemplos de estos tres tipos de archivos, su contenido puede ser extraído o borrado sin afectar el funcionamiento de la herramienta.

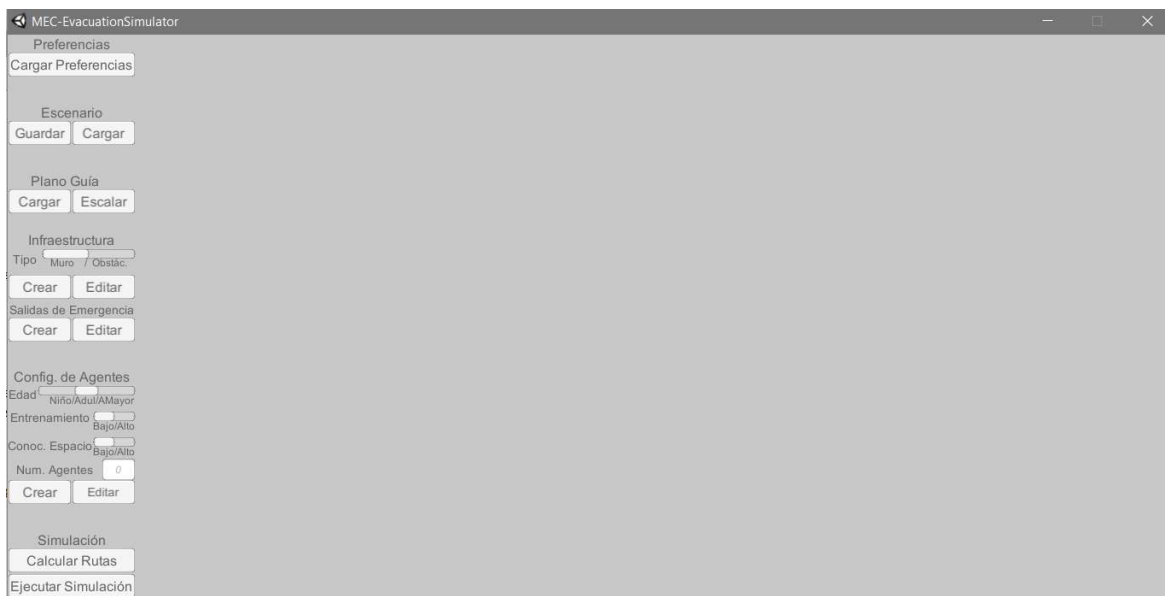
El uso apropiado de la herramienta requiere contar con un teclado para ingresar información a la herramienta como rutas y dimensiones, y oprimir los botones ESC y Suprimir/Delete. También es necesario un mouse con click izquierdo, click derecho, botón central y rueda de desplazamiento. Adicionalmente se recomienda contar con una imagen con los planos del espacio que se desea simular, ya sea en el computador donde se ejecuta la aplicación o la dirección web si se encuentra publicada en internet. Los datos resultantes de la simulación se exportan en archivos .csv por lo que para su

análisis se recomienda el uso de programas como Microsoft Office Excel o Libreoffice Calc.

Para iniciar la herramienta se debe ejecutar el archivo EvacuationSimulator.exe, en ese momento se abrirá una ventana que permitirá elegir la resolución con la que debe funcionar, la calidad de los gráficos y el monitor en el que aparecerá, para luego presionar el botón "Play!". En caso de que la herramienta no se muestre de un tamaño adecuado se recomienda escoger otra resolución en el menú inicial o ajustar la resolución y escala del monitor.



Una vez en la aplicación se pueden observar los botones de funciones en el costado izquierdo de la ventana, todo el resto de la ventana es el área de trabajo. Dependiendo de la función seleccionada aparecerá un cuadro de texto en la parte superior para ingresar información relevante como rutas de archivos o dimensiones, y un botón "Ir" al lado para ingresar al sistema lo que se escriba en el cuadro de texto. También puede aparecer un mensaje debajo de este cuadro de texto con indicaciones y otro en la esquina superior derecha con información contextual como el nombre del elemento seleccionado o el ángulo de giro.



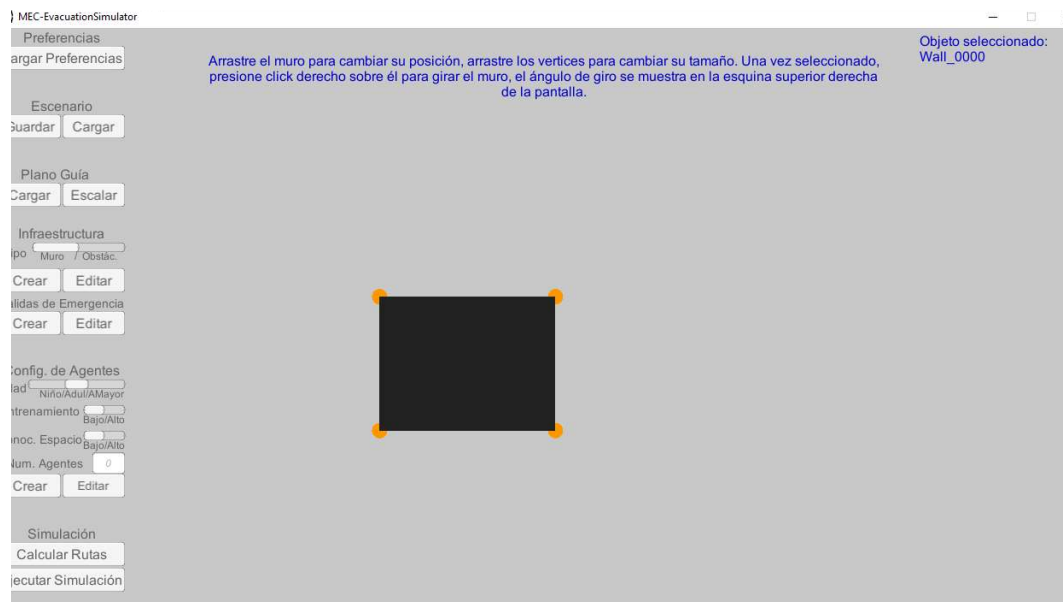


Los botones y sus funciones son:

- **Cargar preferencias:** Habilita un cuadro de texto en la parte superior de la ventana donde se debe ingresar la ruta del archivo de preferencias, al finalizar de anotar la ruta se debe oprimir el botón “Ir” al lado derecho del cuadro de texto. Este archivo permite cambiar parámetros de la interfaz, la creación de muros, salidas, agentes y las variables utilizadas para la simulación, una descripción de estos campos se encuentra al final de este manual.
- **Escenarios:** Guardar / Cargar : Habilita un cuadro de texto en la parte superior de la ventana donde se debe ingresar la ruta del escenario a guardar o cargar, al finalizar de anotar la ruta se debe oprimir el botón “Ir” al lado derecho del cuadro de texto. Este archivo tiene una extensión .sd y contiene un conjunto de muros, salidas y agentes. La función de carga elimina todo lo que esté creado en el área de trabajo para reemplazarlo por lo que esté en el archivo .sd.
- **Plano Guía:**
  - El botón de Cargar habilita un cuadro de texto en la parte superior de la ventana donde se debe ingresar la ruta de la imagen de referencia a cargar. Esta ruta puede ser un directorio en el computador local o la dirección web de la imagen al finalizar de anotar la ruta se debe oprimir el botón “Ir” al lado derecho del cuadro de texto.
  - El botón Escalar es necesario para ajustar la imagen a las dimensiones de la herramienta, es decir que la distancia de un metro en el plano corresponda a un metro en la herramienta. El botón crea un marcador circular en la posición del cursor, deben seleccionarse dos puntos de los cuales se conozca la distancia real, como un muro o el ancho de una puerta y luego anotar esa distancia en metros en el cuadro de texto habilitado en la parte superior de la ventana, siendo el separador decimal punto, al finalizar de anotar la dimensión se debe oprimir el botón “Ir” al lado derecho del cuadro de texto.
- **Infraestructura:**
  - Barra de selección Muros/Obstáculos: permite seleccionar el tipo de infraestructura que se creará con el botón Crear de esta sección.
  - Crear: Crea un marcador circular en la posición del cursor que se mueve únicamente dentro de los puntos de la cuadrícula, la dimensión predefinida de esta cuadrícula es de 2.5cm. Para crear un muro se deben hacer click en dos puntos diferentes del espacio, que corresponderán a las esquinas opuestas del muro. Cuando se crea un muro se habilita la función nuevamente para crear otro, si se desea dejar de crear muros, o cambiar entre muros y obstáculos se debe oprimir el botón ESC.

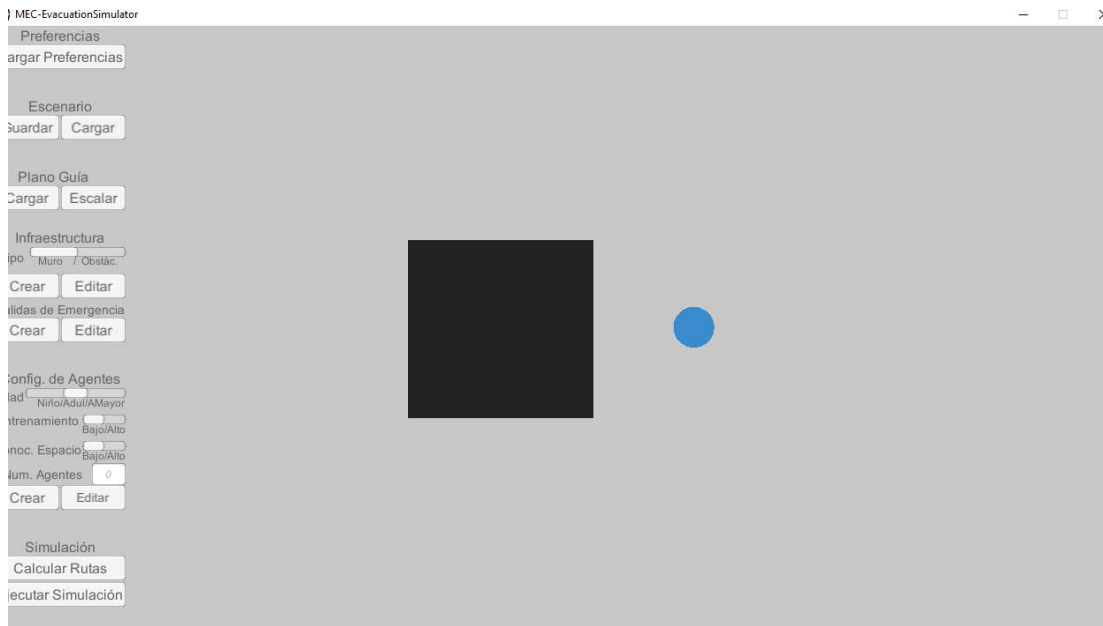


- **Editar:** Al habilitar esta opción se pueden seleccionar los muros y obstáculos creados en el ambiente de trabajo, los muros u obstáculos seleccionados tendrán marcadores en sus vértices que pueden ser arrastrados para cambiar sus dimensiones. El muro u obstáculo puede ser arrastrado para cambiar su posición. Si se tiene un muro u obstáculo seleccionado y se oprime una vez el click derecho se habilitará una función para girarlo, el ángulo de giro se muestra en la esquina superior derecha de la ventana, para concluir con la rotación se debe dar click izquierdo una vez. Finalmente un muro seleccionado puede ser eliminado al oprimir la tecla Suprimir o Delete.

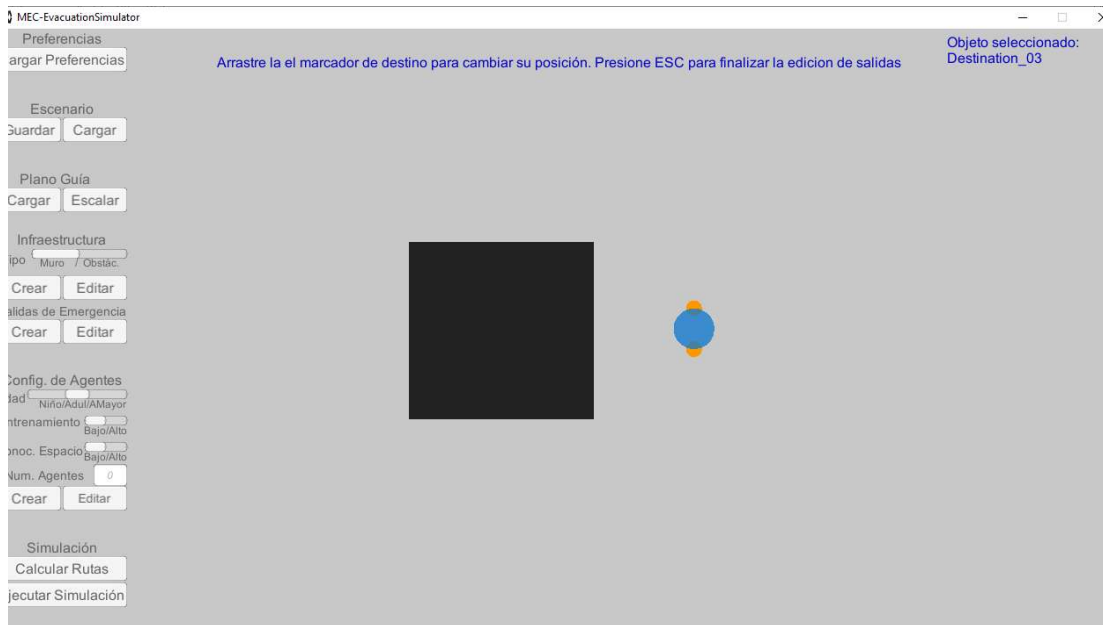


- **Salidas de Emergencia:**

- **Crear:** Crea una salida de emergencia en la posición del cursor, para ubicarla solo es necesario hacer click sobre la posición deseada en el área de trabajo, la primera salida seleccionada debe ser la salida principal del edificio, pues será la elegida por los agentes que no conocen el entorno. Para salir de la funcionalidad de crear salidas solo es necesario presionar la tecla ESC.

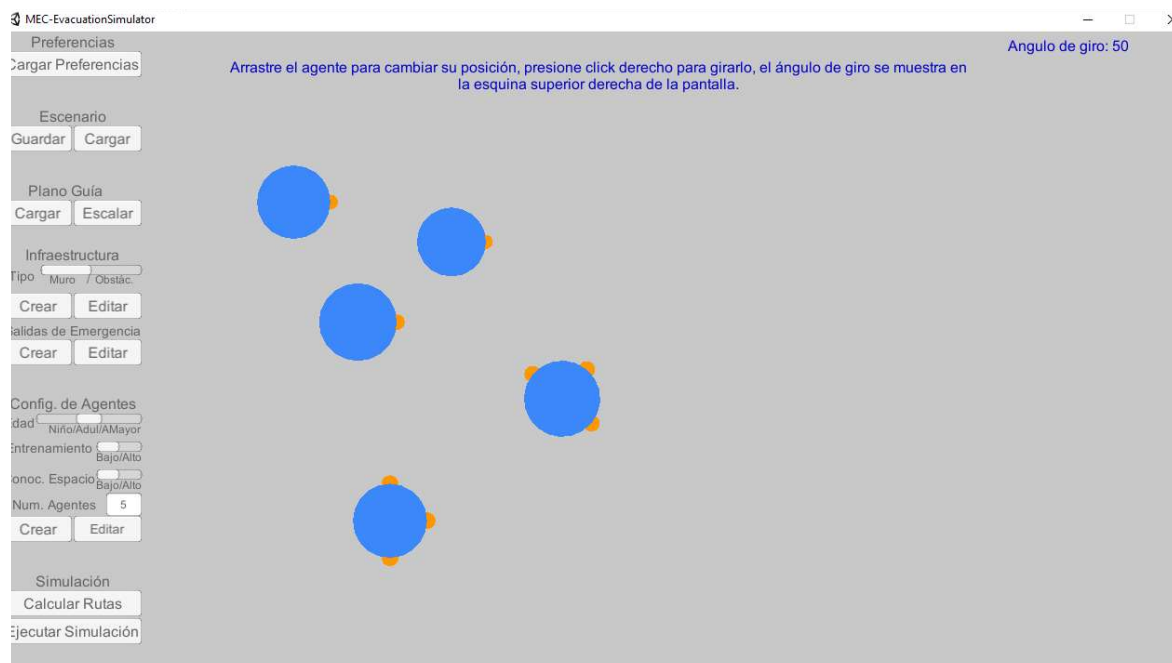


- **Editar:** Permite cambiar la posición de las salidas al arrastrarlas, también es posible borrarlas al seleccionarlas y presionar la tecla Suprimir o Delete.



- **Configuración de Agentes:**

- Edad: En esta barra se escoge la edad de los agentes que se crearán. Este parámetro afecta el tamaño mínimo y máximo que tendrán los agentes y dicho rango puede cambiarse desde el archivo de preferencias, una vez creado el agente su tamaño no podrá cambiarse.
- Entrenamiento: Se refiere al nivel de entrenamiento frente a emergencias que tendrá el agente, puede ser Bajo o Alto y afecta el tiempo de reacción inicial antes de empezar a moverse y su capacidad para mantener la calma durante la evacuación.
- Conocimiento del Espacio: Si se tiene un valor Alto, el agente seleccionará la salida óptima desde su posición inicial, si se selecciona el valor Bajo los agentes escogerán la más cercana entre la salida principal y las salidas que tengan a la vista.
- Número de Agentes: Se debe escribir en el cuadro de texto la cantidad de agentes que se creará con la configuración de Edad, Entrenamiento y Conocimiento del Espacio definida.
- Crear: Habilitará un marcador para seleccionar dos puntos en el espacio de trabajo, generando un cuadrilátero en el que aparecerá la cantidad de agentes definida en el cuadro de texto del punto anterior. Los agentes aparecen como círculos con un círculo más pequeño en la dirección que esta mirando.



- Editar: Permite cambiar la posición de los agentes al arrastrarlos, y su rotación al seleccionarlo (haciendo click izquierdo sobre él) y luego hacer click derecho, el ángulo de giro aparecerá en la parte superior derecha, para seleccionar el ángulo de giro debe hacerse click izquierdo nuevamente. Los agentes seleccionados se ven con tres círculos en lugar de solo uno.

- **Calcular Rutas:** Genera la red de navegación con base en el tamaño y distribución de los muros, obstáculos y salidas, se presentan como un conjunto de nodos y arcos esparcidos por el área de trabajo.
- **Ejecutar Simulación:** Habilita un cuadro de texto en la parte superior de la ventana donde se debe ingresar la ruta del archivo .csv donde se guardarán los datos resultantes de la simulación, si el archivo no existe se creará, si el archivo ya existe los nuevos datos se incluirán al final del mismo. Al presionar el botón Ir al lado del cuadro de texto se validará si la ruta es válida y de ser así iniciará la simulación de la evacuación y simultáneamente la exportación. Cuando todos los agentes hayan terminado de evacuar (desaparezcan de la pantalla) o si el usuario desea interrumpir la simulación podrá oprimir el botón ESC.

### Variables en el archivo de preferencias

El archivo de preferencias debe ser .csv, separado por punto y coma, y separador decimal punto.

Variable	Valor Predeterminado	Significado	Tipo
camVeilColor_a	127	Transparencia con la que se cargará la imagen de referencia.	Entero
creationGizmoSize	0.04	Tamaño con respecto al tamaño de la ventana del marcador de creación.	Entero
creationGuizmoColor_r	33	Componente rojo del color del marcador de creación.	Entero
creationGuizmoColor_g	150	Componente verde del color del marcador de creación.	Entero
creationGuizmoColor_b	243	Componente azul del color del marcador de creación.	Entero
creationGuizmoColor_a	255	Componente de transparencia del color del marcador de creación.	Entero
editionGizmoSize	0.05	Tamaño con respecto al tamaño de la ventana del marcador de edición.	Entero
editionGuizmoColor_r	255	Componente rojo del color del marcador de edición.	Entero
editionGuizmoColor_g	152	Componente verde del color del marcador de edición.	Entero
editionGuizmoColor_b	0	Componente azul del color del marcador de edición.	Entero
editionGuizmoColor_a	255	Componente de transparencia del color del marcador de edición.	Entero
interfaceMsgSize	16	Tamaño de letra de las indicaciones	Entero
interfaceMsgColor_r	0	Componente rojo del color de las indicaciones.	Entero
interfaceMsgColor_g	0	Componente verde del color de las indicaciones.	Entero
interfaceMsgColor_b	200	Componente azul del color de las indicaciones.	Entero
interfaceMsgColor_a	255	Componente de transparencia del color de las indicaciones	Entero
wallColor_r	33	Componente rojo del color de los muros.	Entero
wallColor_g	33	Componente verde del color de los muros.	Entero
wallColor_b	33	Componente azul del color de los muros.	Entero
wallColor_a	255	Componente de transparencia del color de los muros.	Entero
furnitureColor_r	170	Componente rojo del color de los obstáculos.	Entero
furnitureColor_g	170	Componente verde del color de los obstáculos.	Entero
furnitureColor_b	170	Componente azul del color de los obstáculos.	Entero
furnitureColor_a	170	Componente de transparencia del color de los obstáculos.	Entero

Variable	Valor Predeterminado	Significado	Tipo
destinationColor_r	10	Componente rojo del color de las salidas.	Entero
destinationColor_g	120	Componente verde del color de las salidas.	Entero
destinationColor_b	210	Componente azul del color de las salidas.	Entero
destinationColor_a	127	Componente de transparencia del color de las salidas.	Entero
gridSize	0.02	Tamaño de la cuadrícula de interfaz	Decimal en metros
waypointWidth	0.45	Tamaño de los puntos guía.	Decimal en metros
waypointGapToWall	0.05	Distancia al muro u obstáculo del punto guía.	Decimal en metros
waypointColor_r	30	Componente rojo del color de los puntos guía.	Entero
waypointColor_g	210	Componente verde del color de los puntos guía.	Entero
waypointColor_b	50	Componente azul del color de los puntos guía.	Entero
waypointColor_a	31	Componente de transparencia del color de los puntos guía.	Entero
arcWidth	0.01	Ancho de los arcos de la red de navegación.	Entero
arcColor_r	30	Componente rojo del color de los arcos de la red de navegación.	Entero
arcColor_g	210	Componente verde del color de los arcos de la red de navegación.	Entero
arcColor_b	50	Componente azul del color de los arcos de la red de navegación.	Entero
arcColor_a	255	Componente de transparencia del color de los arcos de la red de navegación.	Entero
exportRate	1	Frecuencia en segundos con la que se exportará información de la simulación.	Decimal en segundos
minInitialReactionTime	2	Tiempo mínimo de reacción para los agentes entrenados	Decimal en segundos
maxInitialReactionTime	15	Tiempo máximo de reacción para los agentes sin entrenamiento	Decimal en segundos
agentColor_r	10	Componente rojo del color de los agentes.	Entero
agentColor_g	60	Componente verde del color de los agentes.	Entero
agentColor_b	160	Componente azul del color de los agentes.	Entero
agentColor_a	255	Componente de transparencia del color de los agentes.	Entero
agentZoneColor_r	10	Componente rojo del color de la zona de creación de agentes.	Entero
agentZoneColor_g	60	Componente verde del color de la zona de creación de agentes.	Entero
agentZoneColor_b	160	Componente azul del color de la zona de creación de agentes.	Entero
agentZoneColor_a	127	Componente de transparencia del color de la zona de creación de agentes.	Entero

Variable	Valor Predeterminado	Significado	Tipo
preferredSideAngle	30	Angulo de giro de las personas cuando se encuentran frente a frente	Entero
preferredSideLeft	0	Preferencia por el lado izquierdo 0 = falso, 1 = verdadero	Entero
minChildAgentSize	0.4	Tamaño mínimo de los agentes definidos como Niños	Decimal en metros
minAdultAgentSize	0.45	Tamaño mínimo de los agentes definidos como Adultos	Decimal en metros
minElderAgentSize	0.46	Tamaño mínimo de los agentes definidos como Adultos Mayores	Decimal en metros
maxChildAgentSize	0.42	Tamaño máximo de los agentes definidos como Niños	Decimal en metros
maxAdultAgentSize	0.52	Tamaño máximo de los agentes definidos como Adultos	Decimal en metros
maxElderAgentSize	0.48	Tamaño máximo de los agentes definidos como Adultos Mayores	Decimal en metros
calmChildAgentSpeed	0.8	Velocidad en estado de calma de los agentes definidos como Niños	Decimal en metros por segundo
calmAdultAgentSpeed	1	Velocidad en estado de calma de los agentes definidos como Adultos	Decimal en metros por segundo
calmElderAgentSpeed	0.6	Velocidad en estado de calma de los agentes definidos como Adultos Mayores	Decimal en metros por segundo
maxChildAgentSpeed	1.2	Velocidad máxima de los agentes definidos como Niños	Decimal en metros por segundo
maxAdultAgentSpeed	1.9	Velocidad máxima de los agentes definidos como Adultos	Decimal en metros por segundo
maxElderAgentSpeed	0.9	Velocidad máxima de los agentes definidos como Adultos Mayores	Decimal en metros por segundo
untrainedMaxEvacuationTimeFactor	1.5	Multiplicador para generar el tiempo esperado de los agentes sin entrenamiento	Entero
trainedMaxEvacuationTimeFactor	2	Multiplicador para generar el tiempo esperado de los agentes con entrenamiento	Entero



# Anexo B. Propuesta de trabajo de grado



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
Sede Bogotá

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**Vicedecanatura Académica**  
**POSGRADOS**

## PRESENTACIÓN PROPUESTA

TESIS DE DOCTORADO:  TESIS DE MAESTRÍA:   
TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA:  TRABAJO FINAL DE ESPECIALIZACIÓN

1. PROPONENTE: Miguel Enrique Camargo Boyacá CÉDULA: 1014203001 de Bogotá D.C.
2. PROGRAMA: Maestría En Ingeniería Industrial Perfil Profundización
3. DIRECTOR PROPUESTO: Luis Gerardo Astaiza Amado  
DEPARTAMENTO: Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial
4. TÍTULO: Herramienta de simulación basada en agentes para la evacuación de edificios e instalaciones.  
ÁREA: Simulación, Dinámica de Sistemas.  
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Sistemas basados en agentes.

## 5. ANTECEDENTES:

Considerando el propósito investigativo y práctico del trabajo propuesto los antecedentes y el estado del arte revisados se dividen en tres componentes principales. El primero de estos componentes está enfocado en los hallazgos realizados en el estudio del comportamiento de las multitudes, las técnicas utilizadas y las limitaciones de estas. En el segundo componente se busca describir los diferentes modelos utilizados, así como enumerar los principales atributos a tener en cuenta en la simulación de multitudes. El tercer componente se enfoca en las herramientas disponibles para la generación de contenidos interactivos, característica fundamental que el conocimiento de los dos componentes anteriores sea aplicado y traducido en solución de problemas y toma de decisiones.

### 5.1. Metodología y Hallazgos

El estudio de las multitudes (Behavioural Research o Crowd Behaviour) ha sido ampliamente abordado desde el último cuarto del siglo pasado pero sigue considerándose un problema abierto debido a la complejidad del comportamiento humano en este ambiente, Xu et al., (2015) indica además que el punto clave es el correcto entendimiento del comportamiento colectivo de las multitudes para lo cual una solución posible es el hallazgo de las reglas que los peatones siguen inconscientemente para moverse a través de espacios concurridos.

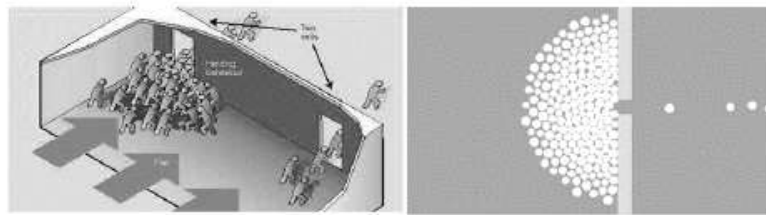
Estudiar las multitudes es difícil porque requiere gente real expuesta a peligros reales, y en el caso de los simulacros la gente no toma el tema en serio por lo que los datos no son completamente confiables (Almeida et al., 2013). En este sentido la dinámica del movimiento normal, es decir sin pánico, ha sido estudiada con el fin de ser aplicada en la industria de los videojuegos, la arquitectura y el diseño urbanístico, identificando patrones como por ejemplo el principio del menor esfuerzo (Helbing et al., 2002; Helbing, et al., 2001) que son luego aplicados a los modelos ajustados a ambientes peligrosos.

De esta manera, el estudio del movimiento bajo situaciones de pánico ha sido principalmente simulado o empírico dado el riesgo que supone enfrentar a individuos a peligros reales con el fin de recolectar información. Aun así, sicólogos sociales han encontrado que interferencias, apiñamientos, episodios de violencia, malas decisiones y comportamientos poco racionales en general, son causados por el pánico (Oğuz et al., 2010). Esta diferencia es reconocida por autores como Almeida et al., (2013) cuando dice que "El comportamiento bajo ciertas situaciones como

pánico por ejemplo es muy diferente al registrado en un estado normal, se tiende a disminuir la zona de confort, se aumenta la velocidad y se presenta un incremento del nerviosismo”, o como Helbing et al., (2000) que menciona : “En las emergencias, las personas están sometidas a una presión anormal por lo que las reacciones psicológicas y de comportamiento tanto a nivel individual como grupal son bastante diferentes a las que tendrían en estado normal, y esto puede generar mucha incertidumbre”.

En general los estudios han llegado a conclusiones similares en el estudio del comportamiento de multitudes en ambientes de emergencias, por ejemplo:

- Cuando la gente no conoce el edificio en el que se encuentra es común que busquen salir del edificio por la misma ruta en la que entraron, perder el sentido de la orientación y presentar comportamientos no adaptativos, como empujar o golpear (Helbing et al., 2002).
- Se identifican dos fenómenos, Herding o pastoreo, caracterizado por falta de lógica, falta de independencia, seguimiento de órdenes. Y Flocking o agrupación que es la creación de grupos de personas durante las emergencias, en los que la ansiedad y el nerviosismo son crecientes (Helbing et al., 2002).
- En los accesos y cuellos de botella se suelen generar arcos de personas al intentar acceder rápidamente a dichas salidas (Helbing et al., 2002). Estos dos últimos fenómenos pueden visualizarse en la *Figura 5.1*.



*Figura 5.1. Fenómenos de Herding, Flocking y Cuellos de botella. Adaptado de Helbing et al., (2002). Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. Pedestrian and evacuation dynamics, Figure (-)*

- El cambio de dirección de un peatón está limitado por la velocidad a la que se desplaza, lo que quiere decir que para realizar giros pronunciados debe reducir la velocidad (Seitz et al., 2015),



lo que a su vez afecta la velocidad en las zonas en las que convergen dos o más pasillos, aun cuando no hay otras personas bloqueando el paso (Shiwakoti, 2015).

- La velocidad de escape y la selección de rutas varían en tiempo real y dependen de la percepción del entorno y el estado psicológico y fisiológico del individuo (Shields & Boyce, 2000; Ozel, 2001).

Por otro lado, en la revisión de la literatura también se encuentran casos en los que estudios enfocados en generar recomendaciones para planes de atención de emergencias han arrojado resultados contradictorios para escenarios relativamente similares, por ejemplo, mientras que Shao & Yang (2015) afirman que en un espacio cerrado, múltiples salidas hacen la evacuación más lenta, y que una salida ubicada en una esquina del recinto es la mejor solución, Cao et al. (2015) menciona que la implementación de múltiples salidas es una forma efectiva de reducir el tiempo de evacuación en caso de visibilidad nula y Wu et al. (2015) afirma que una puerta en la mitad de la pared es la posición óptima para una evacuación.

Como conclusión puede decirse que, aunque hay avances en la comprensión del comportamiento colectivo, hay escasas de información cuantitativa que facilite el modelado de todos los mecanismos subyacentes en la simulación de multitudes (Seitz et al., 2015).

## 5.2. Principales Modelos

Los modelos de evacuación fueron inspirados por los campos de la investigación de operaciones y la ingeniería de transportes, en estos modelos generalmente se busca la minimización del tiempo total de evacuación, ya sea de todo el sistema o de un individuo particular (Xu et al., 2015).

Almeida et al., (2013) presenta la siguiente clasificación y definición de los modelos:

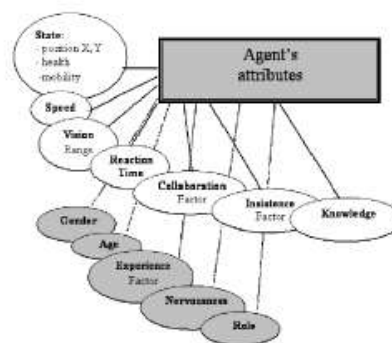
- Modelos basados en Flujos: También llamados modelos macroscópicos, utilizan una representación de nodos y arcos donde los nodos equivalen a estructuras físicas como habitaciones o pasillos, que contienen personas y un volumen máximo, mientras que los arcos interconectan los nodos y restringen el flujo de personas entre ellos.
- Celular Automata: En estos modelos el espacio es discretizado por medio de una cuadrícula, se utilizan rangos de tiempo que determinan la duración del movimiento en cada unidad espacial y el movimiento se da únicamente a las 8 posiciones adyacentes. Aunque

permite análisis micro y macroscópicos no permite modelar movimientos erráticos ni la interacción entre las personas, es el modelo más utilizado en Serious Games.

- Modelos basados en Agentes: Multi-Agent Systems (MAS), son probablemente la solución más realista ya que recrean a cada individuo y su relación con el entorno y otros individuos. Se ha popularizado en los últimos años y se han presentado varios trabajos al respecto. Son bastante complejos y requieren gran cantidad de datos, reglas y recursos computacionales. Suele valerse del conocimiento social de investigadores de campos distintos a los de las ciencias computacionales.

Los modelos basados en agentes han incluido los fenómenos de colaboración o competencia entre los individuos, no suelen tener un sistema de control global ya que el objetivo es observar las dinámicas aleatorias de los agentes. También se han realizado trabajos en los que se incluye el modelo de creencias, deseos e intenciones (Beliefs, Desires and Intentions – BDI) aumentando el grado de realismo de la simulación (Almeida et al., 2013).

Tang & Ren, (2008) listan entre los atributos que debe tener un agente el estado (Posición, Salud, Grado de Movilidad), la velocidad, la visión, el tiempo de reacción, el factor de colaboración, el factor de insistencia, y el conocimiento, a lo que Almeida et al., 2013 añaden el género, la edad, el factor de experiencia, el factor de nerviosismo y el rol que desempeña durante la evacuación, en la organización, o su influencia sobre las decisiones de los demás agentes. Esta lista se puede apreciar en la *Figura 5.2*.



*Figura 5.2.* Tomado de Almeida et al., (2013). Crowd Simulation Modeling Applied to Emergency and Evacuation Simulations using Multi-Agent Systems. Figura. arXiv preprint arXiv:1303.4692.

Existen otros modelos importantes que vale la pena mencionar, los basados en fuerzas, que se derivan del concepto de los potenciales de atracción y repulsión alrededor de un objetivo, un obstáculo u otros peatones (Helbing et al., 1995), y los modelos basados en el comportamiento de paso natural en humanos (Seitz et al., 2012) en los que la posición y dirección del siguiente paso es determinado por la distancia que se puede cubrir con un paso desde la posición actual.

En cuanto a modelos psicológicos vale la pena mencionar la teoría de la motivación de protección (Protection Motivation Theory – PMT) (Rogers, 1975, 1983, 1997). donde dos variables subjetivas caracterizan la evaluación de peligro, la vulnerabilidad percibida descrita como el grado de susceptibilidad a la amenaza un individuo considera que posee, y la severidad percibida, que se refiere a la seriedad con que una amenaza puede arriesgar la vida del individuo (Milne, Sheeran, & Orbell, 2000; Norman, Boer, & Seydel, 2005).

### 5.3. Serious Games y motores

Los Serious Games pueden ser definidos como videojuegos que son creados con fines diferentes al entretenimiento, como el entrenamiento o la educación (Ribeiro et al., 2012). Estos juegos han tenido gran aplicación en el ambiente de la capacitación de evacuaciones de personal debido a su mayor eficacia en la enseñanza e influencia del comportamiento de los jugadores en comparación con medios no interactivos (Peng, 2008)

Ribeiro et al., (2012) selecciona Unity 3D como el motor apropiado para desarrollar su trabajo debido a su poderosa interfaz, un amplio ambiente de programación que permite el uso de Java, C# y Boo, y finalmente la posibilidad de exportación del proyecto para múltiples plataformas sin necesidad de configuraciones adicionales.

Adicionalmente, la comunidad de desarrolladores en Unity 3D ha generado una amplia cantidad de tutoriales, guías, foros y contenidos gratuitos en internet lo que facilita su uso y la resolución de dudas o problemas durante los proyectos desarrollados en este motor.



#### 6. JUSTIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA:

Las emergencias que requieren evacuación de edificios e instalaciones para la protección de la vida humana no pueden ser anticipadas por completo, pero pueden ser gestionadas para reducir las pérdidas económicas y humanas que se derivan de estas. Con este fin los gobiernos han creado leyes y programas enfocados en la promoción de actividades como la adecuación y dotación de edificios, el entrenamiento de personal de rescate y la programación de simulacros, sin embargo, estos últimos son especialmente costosos en términos de tiempo y de recursos económicos por lo que la simulación de los mismos ha sido una práctica común para muchas organizaciones.

Si bien existen simuladores como EXODUS, EGRESS, SIMULEX, PedGO entre otros que permiten probar modelos y obtener resultados de gran calidad, incluso algunos utilizando archivos CAD como input para el proceso de ejecución, ninguno de ellos tiene una licencia gratuita para uso diferente al científico por lo que no es apropiado para su uso con fines prácticos, ni están enfocados a usuarios con pocos conocimientos científicos o técnicos de los modelos expuestos en la revisión de la literatura.

La herramienta que se busca desarrollar en este proyecto se refiere a un software interactivo en el que los usuarios puedan aplicar el modelo de simulación diseñado, sobre representaciones virtuales de los edificios e instalaciones que sean de su interés, en el que además puedan configurar las características de los agentes para que se ajusten a la edad, género, velocidad, experiencia, etc. de la población, y que estos actúen de acuerdo a los planes de evacuación que se determinen para cada escenario.

Preliminarmente se plantea una representación virtual en dos dimensiones de una vista de techo, similar a la observada en el juego "Hot Line Miami" desarrollado en el motor Game Maker, pero con menos detalle y variedad en la cantidad de mobiliario ilustrado en la *Figura 6.1.* Por otro lado, el sistema construcción de edificios donde se localizarán los agentes buscaría adaptar a un ambiente bidimensional el sistema que utilizan las últimas versiones del juego The Sims en el que las habitaciones, muros, puertas, escaleras, etc. se seleccionan de un menú y se ubican arrastrándolas por la pantalla, ajustando automáticamente su posición unas junto a las otras como se puede observar en la *Figura 6.2.*

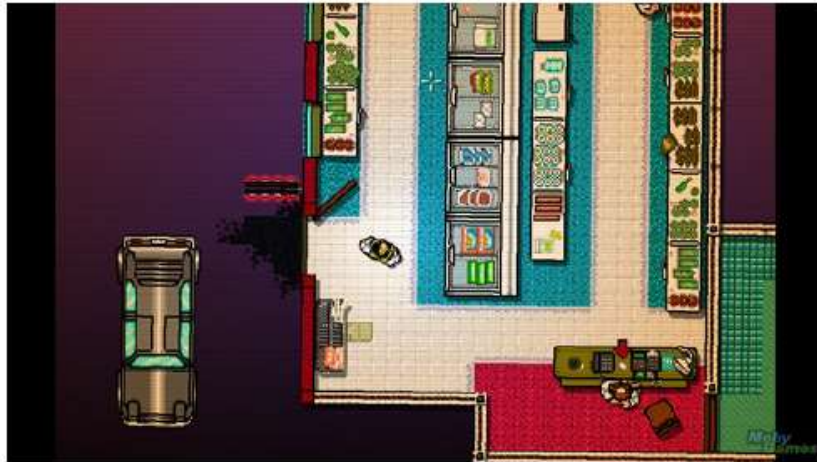


Figura 6.1. Representación de un supermercado en el juego Hot Line Miami en el que se observa un vehículo en la parte exterior, un cliente cerca a la puerta, un tendero en la parte inferior derecha y refrigeradores, estantes y productos en la parte superior., Tomado de <http://aquivaletodo.blogspot.com.co/2014/05/hotline-miami-videojuego.html>



Figura 6.2. En la izquierda se puede observar la representación de una casa de un piso en el juego The Sims 3, A la derecha se encuentra la interfaz de creación utilizada en el juego The Sims 4, en el que se puede observar las herramientas de muros que pueden ser utilizadas y las opciones de edición de las habitaciones una vez insertadas en el proyecto. Tomado de <http://www.cars-sims-3-guide.com/buildedit/houses/>.



## 7. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

**OBJETIVO GENERAL:** Desarrollar una herramienta de simulación basada en agentes para la evacuación de edificios e instalaciones, que pueda ser utilizado por usuarios con recursos económicos, académicos y/o tecnológicos limitados para identificar oportunidades de mejora o puntos críticos en los planes de atención a emergencias, principalmente en las rutas de evacuación de personas.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Diseñar un modelo basado en agentes que permita simular la evacuación de personas teniendo en cuenta la diversidad en atributos como movilidad, posición, edad, nerviosismo, entre otros recomendados por la literatura.
- Desarrollar un entorno que permita aplicar el modelo diseñado en el punto anterior en diferentes estructuras (edificios e instalaciones) para identificar oportunidades de mejora o puntos críticos en los planes de atención a emergencias, principalmente en las rutas de evacuación de personas.
- Generar la documentación pertinente para que el entorno desarrollado en el punto anterior pueda ser utilizada por personas con recursos económicos, académicos y/o tecnológicos limitados.

#### 8. METODOLOGÍA:

El diseño del modelo de simulación será conducido de acuerdo al protocolo ODD desarrollado por Railsback, S. F., & Grimm, V. (2011). dado que facilita tanto el diseño como la documentación de los modelos basados en agentes. La principal variación que se implementará con respecto al libro *Agent-Based and Individual-Based Modeling* consiste en que la aplicación del protocolo no se realizará en NetLogo sino en Unity, lo que implica algunos desarrollos previos que permitan poner a prueba el modelo basado en agentes a medida que se desarrolle. Las dudas que surjan durante el desarrollo del modelo serán resueltas por el director del proyecto.

El desarrollo de la herramienta o software se ejecutará de manera sistemática, dando prioridad a la ejecución del modelo, luego a la configuración por parte del usuario y finalmente a los aspectos de simplicidad y claridad de la interfaz, esta secuencia obedece a que de esta manera es posible avanzar de manera simultánea en el desarrollo del modelo de comportamiento de multitudes, y en el entorno en el que será aplicado, lo que reducirá pérdidas de tiempo ocasionadas por dudas o definiciones pendientes con respecto al modelo, o bugs durante la aplicación del mismo.

La documentación necesaria para la comprensión del modelo será desarrollada siguiendo el protocolo ODD mientras que la documentación necesaria para el uso del software será desarrollada conforme se validen y finalicen los módulos del mismo, dichos módulos comprenden la configuración y ubicación de los agentes, la representación virtual de los edificios e infraestructuras en los que se desea ejecutar el modelo y la exportación de resultados de la simulación.

También se incluirá una vigilancia tecnológica enfocada en los siguientes temas o tesauros: Behavioral Research, Computer Simulation, Multi Agent Systems, y Autonomous Agents.

## 9. ACTIVIDADES A DESARROLLAR:

### 1. Preparación del proyecto de Unity para el desarrollo del modelo basado en agentes:

- a. La selección y representación digital de los agentes, que puede ser tan simple como círculos o cilindros que se mueven por el espacio virtual, o tan complicada como modelos tridimensionales de personas, con animaciones en estado de espera, caminando, corriendo, en estado de ira, heridas, etc. De esta selección dependerá también la representación virtual de los edificios e infraestructuras.
- b. La selección y representación digital de un edificio que requiera una evacuación en el que se pueda probar el comportamiento de los agentes, es decir que cuente con características como múltiples rutas de evacuación, corredores estrechos, escaleras, pasillos que se fusionen, etc.

### 2. Desarrollo del modelo basado en agentes según el protocolo ODD, en el que se definirá, describirá y desarrollará el modelo de simulación basado en agentes en todos los componentes descritos en la metodología, a saber:

#### a. GENERALIDADES

- i. Propósito
- ii. Entidades, variables de estado y escalas
- iii. Generalidades y secuencia de los procesos

#### b. CONCEPTOS DE DISEÑO

- i. Principios básicos
- ii. Comportamientos emergentes
- iii. Adaptación
- iv. Objetivos
- v. Aprendizaje
- vi. Predicción
- vii. Percepción
- viii. Interacción
- ix. Estocasticidad
- x. Colectividad
- xi. Observación

#### c. DETALLES

- i. Inicialización

- ii. Información de insumo
  - iii. Submodelos
- 3. Desarrollo del entorno de simulación:
  - a. Desarrollo del módulo de configuración y localización de agentes.
  - b. Desarrollo del módulo de representación virtual de edificios e infraestructuras.
  - c. Desarrollo del módulo de ejecución del modelo
  - d. Desarrollo del módulo de exportación de resultados.
- 4. Consolidación y Edición de la documentación del modelo y manual de usuario.
- 5. Revisión de avances, recomendaciones y visto bueno del director.
- 6. Retroalimentación de profesionales.
- 7. Vigilancia Tecnológica.

## CRONOGRAMA:

Se tiene planeado que la ejecución del siguiente cronograma inicie en cuanto sea aprobada la presente propuesta. Las actividades de vigilancia tecnológica, validación con el director, y retroalimentación de profesionales serán ejecutadas de manera constante durante la ejecución del proyecto.

ACTIVIDAD	SEMANA
1. Preparación del proyecto de Unity para el desarrollo del modelo basado en agentes:	1-2
a. La selección y representación digital de los agentes	1
b. La selección y representación digital de un edificio	2
2. Desarrollo del modelo basado en agentes según el protocolo ODD:	3-20
a. GENERALIDADES	3
i. Propósito	3
ii. Entidades, variables de estado y escalas	3
iii. Generalidades y secuencia de los procesos	3
b. CONCEPTOS DE DISEÑO	4-20
i. Principios Básicos	4
ii. Comportamientos emergentes	5
iii. Adaptación	6
iv. Objetivos	7
v. Aprendizaje	8
vi. Predicción	9
vii. Percepción	10
viii. Interacción	11
ix. Estocasticidad	12
x. Colectividad	13
xi. Observación	14-16
c. DETALLES	17-20
i. Inicialización	17
ii. Información de Insumo	18
iii. Submodelos	19-20
3. Desarrollo del entorno de simulación:	14-27
a. Desarrollo del módulo de configuración y localización de agentes.	21-23
b. Desarrollo del módulo de representación virtual de edificios e infraestructuras.	24-27
c. Desarrollo del módulo de ejecución del modelo	28-34
d. Desarrollo del módulo de exportación de resultados.	35-37
4. Consolidación y Edición de la documentación del modelo y manual de usuario.	37-42



## 10. BIBLIOGRAFÍA BÁSICA:

- Almeida, J. E., Rossetti, R. J., & Coelho, A. L. (2013). Crowd Simulation Modeling Applied to Emergency and Evacuation Simulations using Multi-Agent Systems. arXiv preprint arXiv:1303.4692.
- Cao, S., Song, W., Lv, W., & Fang, Z. (2015). A multi-grid model for pedestrian evacuation in a room without visibility. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 436, 45-61.
- Helbing, D., & Molnar, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, 51(5), 4282.
- Helbing, D., Farkas, I. J., Molnar, P., & Vicsek, T. (2002). Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. *Pedestrian and evacuation dynamics*, 21(2), 21-58.
- Helbing, D., Farkas, I., & Vicsek, T. (2000). Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407(6803), 487-490.
- Helbing, D., Molnar, P., Farkas, I. J., & Bolay, K. (2001). Self-organizing pedestrian movement. *Environment and planning B*, 28(3), 361-384.
- Milne, S., Sheeran, P., & Orbell, S. (2000). Prediction and intervention in health-related behavior: A meta-analytic review of protection motivation theory. *Journal of Applied Social Psychology*, 30(1), 106-143.
- Norman, P., Boer, H., & Seydel, E. R. (2005). Protection motivation theory.
- Oğuz, O., Akaydin, A., Yılmaz, T., & Gündükbay, U. (2010). Emergency crowd simulation for outdoor environments. *Computers & Graphics*, 34(2), 136-144.
- Ozel, F. (2001). Time pressure and stress as a factor during emergency egress. *Safety Science*, 38(2), 95-107.
- Peng, W. (2008). The mediational role of identification in the relationship between experience mode and self-efficacy: Enactive role-playing versus passive observation. *CyberPsychology & Behavior*, 11(6), 649-652.
- Railsback, S. F., & Grimm, V. (2011). Agent-based and individual-based modeling: a practical introduction. Princeton university press.
- Ribeiro, J., Almeida, J. E., Rossetti, R. J., Coelho, A., & Coelho, A. L. (2012, June). Using serious games to train evacuation behaviour. In *Information Systems and Technologies (CISTI), 2012 7th Iberian Conference on* (pp. 1-6). IEEE.
- Rogers, R. W. (1975). A protection motivation theory of fear appeals and attitude change<sup>1</sup>. *The journal of psychology*, 91(1), 93-114.
- Rogers, R. W., & Prentice-Dunn, S. (1997). Protection motivation theory.

- Rogers, R. W., Cacioppo, J. T., & Petty, R. (1983). Cognitive and physiological processes in fear appeals and attitude change: A revised theory of protection motivation. In *Social psychophysiology: A sourcebook* (pp. 153-177).
- Seitz, M. J., & Köster, G. (2012). Natural discretization of pedestrian movement in continuous space. *Physical Review E*, 86(4), 046108.
- Seitz, M. J., Dietrich, F., & Köster, G. (2015). The effect of stepping on pedestrian trajectories. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 421, 594-604.
- Shao, Z. G., & Yang, Y. Y. (2015). Effective strategies of collective evacuation from an enclosed space. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 427, 34-39.
- Shields, T. J., & Boyce, K. E. (2000). A study of evacuation from large retail stores. *Fire Safety Journal*, 35(1), 25-49.
- Shiwakoti, N., Gong, Y., Shi, X., & Ye, Z. (2015). Examining influence of merging architectural features on pedestrian crowd movement. *Safety Science*, 75, 15-22.
- Tang, F., & Ren, A. (2008). Agent-based evacuation model incorporating fire scene and building geometry. *Tsinghua Science & Technology*, 13(5), 708-714.
- Wu, J., Wang, X., Chen, J., Shu, G., & Li, Y. (2015). The position of a door can significantly impact on pedestrians' evacuation time in an emergency. *Applied Mathematics and Computation*, 258, 29-35.
- Xu, M., Wu, Y., Lv, P., Jiang, H., Luo, M., & Ye, Y. (2015). miSFM: On Combination of Mutual Information and Social Force Model towards Simulating Crowd Evacuation. *Neurocomputing*.

#### 11. RECURSOS FÍSICOS:

Los recursos necesarios para finalizar el proyecto incluyen

- Un computador con prestaciones suficientes para desarrollar contenidos complejos en Unity, actualmente se cuenta con un equipo Asus N56J con un procesador Intel i7 4700, 8 GB de memoria RAM, y una tarjeta de video dedicada NVIDIA GEFORCE GTX 760M y sistema operativo Windows 10.
- La licencia personal de Unity 3D es gratuita y cuenta con la totalidad de elementos necesarios para llevar a cabo el proyecto.
- Recursos de información tales como acceso a internet y a las bases de datos (recursos y herramientas bibliográficas) de la Universidad Nacional.
- Tiempo de consulta con el director del proyecto.
- También es ideal contar con la retroalimentación de profesionales en gestión del riesgo.



**12. COSTOS DEL TRABAJO Y FUENTES DE FINANCIACIÓN:**

Los costos del trabajo ajenos a la operación normal de la universidad (disponibilidad del docente, acceso a las bases de datos, etc.) serán asumidos por el estudiante, lo que comprende el uso de recursos computacionales, búsqueda de información, desarrollo del modelo y software, y respaldo digital de los avances del proyecto. Se procurará el uso de recursos gratuitos y libres siempre que sea posible.

13. COMENTARIO CON VISTO BUENO DEL DIRECTOR:

El tema de la simulación de evacuaciones ha sido abordado utilizando varios enfoques de solución, sin embargo, se considera conveniente utilizar el enfoque de simulación basada en agentes dado que se puede incorporar heterogeneidad y condiciones diversas que deben ser tenidas en cuenta. Desde el punto de vista académico el proyecto involucra el uso de metodologías de resolución de problemas propias de la disciplina, de las cuales un componente importante es el modelamiento y la simulación. En cuanto a la organización, la propuesta se acopla a los requerimientos de una tesis de maestría. Finalmente, el tema es de alta relevancia dada la importancia de resolver este tipo de situación que frecuentemente se presentan

14. FIRMA DEL PROPONENTE

Miguel Enrique Camargo Boyacá  
Ingeniero Industrial  
Universidad Nacional de Colombia

15. FIRMA DEL DIRECTOR

Luis Gerardo Astaiza Amado  
Magister en Ingeniería de Sistemas, Ingeniería Industrial e Investigación de Operaciones,  
Profesor Titular — Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial  
Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá

16. FECHA: 13 de noviembre de 2015

## 8. Bibliografía

- Almeida, J. E., Rosseti, R. J. F., & Coelho, A. L. (2013). Crowd Simulation Modeling Applied to Emergency and Evacuation Simulations using Multi-Agent Systems. *DSIE'11 - 6th Doctoral Symposium on Informatics Engineering*, 93–104. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1303.4692>
- Burstedde, C., Klauck, K., Schadschneider, A., & Zittartz, J. (2001). Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 295(3–4), 507–525. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(01\)00141-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(01)00141-8)
- Chattaraj, U., Seyfried, A., & Chakroborty, P. (2009). Comparison of Pedestrian Fundamental Diagram Across Cultures, 1–12. <https://doi.org/10.1142/S0219525909002209>
- Chen, X. (2008). Agent-based modelling and simulation of urban evacuation : relative effectiveness of simultaneous and staged evacuation strategies. *Journal of the Operational Research Society*, 59(March), 25–33. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602321>
- Cheney, S. (2004). Flow tiles. *Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, 233–242.
- Chhugani, J., Kim, C., Satish, N., Lin, M., Manocha, D., & Dubey, P. (2009). ClearPath: Highly Parallel Collision Avoidance for Multi-Agent Simulation. *ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, 12. <https://doi.org/10.1145/1599470.1599494>
- Crooks, A., Castle, C., & Batty, M. (2008). Key challenges in agent-based modelling for geo-spatial simulation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32(6), 417–430. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2008.09.004>
- D’Orazio, M., Longhi, S., Olivetti, P., & Bernardini, G. (2015). Design and experimental evaluation of an interactive system for pre-movement time reduction in case of fire. *Automation in Construction*, 52, 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.02.015>

- Duives, D. C., Daamen, W., & Hoogendoorn, S. P. (2014). State-of-the-art crowd motion simulation models. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 37, 193–209. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.02.005>
- Gladstone, R. (2015). Death Toll From Hajj Stampede Reaches 2,411 in New Estimate. *The New York Times*. Retrieved from <https://www.nytimes.com/2015/12/11/world/middleeast/death-toll-from-hajj-stampede.html>
- Gwizdała, T. M. (2015). Some properties of the floor field cellular automata evacuation model. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 419, 718–728. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.10.070>
- Gwynne, S. ., Galea, E. R., & Owen, M. (1999). A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment. *Building and Environment*. Retrieved from [https://fseg.gre.ac.uk/fire/Building&Environment\\_Paper.pdf](https://fseg.gre.ac.uk/fire/Building&Environment_Paper.pdf)
- Gwynne, S., Galea, E. R., Lawrence, P. J., & Filippidis, L. (2001). Modelling occupant interaction with fire conditions using the buildingEXODUS evacuation model. *Fire Safety Journal*, 36(4), 327–357. [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(00\)00060-6](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(00)00060-6)
- Gwynne, S., Galea, E. R., Owen, M., Lawrence, P. J., & Filippidis, L. (2005). A systematic comparison of buildingEXODUS predictions with experimental data from the Stapelfeldt trials and the Milburn House evacuation. *Applied Mathematical Modelling*, 29(9), 818–851. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2004.11.005>
- Hajibabai, L., Delavar, M. R., Malek, M. R., & Frank, a U. (2007). Agent-Based Simulation of Spatial Cognition and Wayfinding in Building Fire Emergency Evacuation. *Geomatics Solutions for Disaster Management*, 255–270. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-72108-6\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-540-72108-6_17)
- Hamacher, H. W., & Tjandra, S. A. (2002). Mathematical modelling of evacuation problems: a state of the art. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, 24(24), 227–266. <https://doi.org/citeulike-article-id:6650160>
- Helbing, D. (1998). A Mathematical Model for the Behavior of Pedestrians, (d). <https://doi.org/10.1002/bs.3830360405>
- Helbing, D., Buzna, L., Johansson, A., & Werner, T. (2005). Self-organized pedestrian crowd dynamics: Experiments, simulations, and design solutions. *Transportation Science*, 39(1), 1–24. <https://doi.org/10.1287/trsc.1040.0108>
- Helbing, D., Farkas, I., Molnár, P., & Vicsek, T. (2002). Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, 21, 21–58.

- Retrieved from  
[http://www.researchgate.net/publication/224010870\\_Simulation\\_of\\_pedestrian\\_crowds\\_in\\_normal\\_and\\_evacuation\\_situations/file/d912f50eb0d9bb6224.pdf](http://www.researchgate.net/publication/224010870_Simulation_of_pedestrian_crowds_in_normal_and_evacuation_situations/file/d912f50eb0d9bb6224.pdf)
- Helbing, D., & Johansson, A. (2013). Pedestrian, Crowd, and Evacuation Dynamics. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-27737-5\\_382-5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27737-5_382-5)
- Helbing, D., Molnár, P., Farkas, I. J., & Bolay, K. (2001). Self-organizing pedestrian movement. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28(3), 361–383. <https://doi.org/10.1068/b2697>
- Huang, H. J., & Guo, R. Y. (2008). Static floor field and exit choice for pedestrian evacuation in rooms with internal obstacles and multiple exits. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 78(2), 1–6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.78.021131>
- Hughes, R. L. (2003). The flow of human crowds. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 35(1), 169–182. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.35.101101.161136>
- Johansson, A., Helbing, D., Al-Abideen, H. Z., & Al-Bosta, S. (2008). From Crowd Dynamics to Crowd Safety: A Video-Based Analysis. <https://doi.org/10.1142/S0219525908001854>
- Johnson, N. R. (2012). Panic at “The Who Concert Stampede”: An Empirical Assessment. *Social Problems*, 34(4), 362–373. <https://doi.org/10.2307/800813>
- Kirchner, A., Klüpfel, H., Nishinari, K., Schadschneider, A., & Schreckenberg, M. (2003). Simulation of competitive egress behavior: Comparison with aircraft evacuation data. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 324(3–4), 689–697. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(03\)00076-1](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(03)00076-1)
- Kisko, T. M., Francis, R. L., & Nobel, C. R. (1998). Evacnet4 user’s guide. Retrieved from <http://tomkisko.com/ise/files/evacnet/EVAC4UG.HTM>
- Manley, M. T. (2012). Exitus: An Agent-Based Evacuation Simulation Model For Heterogeneous Populations.
- Moussaïd, M., Perozo, N., Garnier, S., Helbing, D., & Theraulaz, G. (2010). The Walking Behaviour of Pedestrian Social Groups and Its Impact on Crowd Dynamics. *PLoS ONE*, 5(4), e10047. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010047>
- Nishinari, K., & Kirchner, A. (2004). Extended floor field CA model for evacuation dynamics. *IEICE Transactions on ...*, (3), 726–732. Retrieved from [http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e87-d\\_3\\_726](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e87-d_3_726)

- Olfati-Saber, R. (2006). Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 51(3), 401–420. <https://doi.org/10.1109/TAC.2005.864190>
- Pan, X., Han, C. S., Dauber, K., & Law, K. H. (2007). A Multi-agent Based Framework for the Simulation of Human and Social Behaviors during Emergency Evacuations. *Ai & Society*, 1–17. <https://doi.org/10.1.1.136.9965>
- Pelechano, N., Allbeck, J. M., & Badler, N. I. (2007). Controlling individual agents in high-density crowd simulation. *Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH Eurographics Symposium on Computer Animation*, 1, 108. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2007.06.005>
- Pelechano, N., & Badler, N. I. (2006). Modeling Crowd and Trained Leader Modeling Crowd and Trained Leader Behavior during. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 26(6), 80–86. <https://doi.org/10.1109/MCG.2006.133>
- Pelechano, N., & Malkawi, A. (2007). Comparison of crowd simulation for building evacuation and an alternative approach. *Building Simulation 2007 Vols 13 Proceedings*, 1514–1521.
- Railsback, S. F., & Grimm, V. (2017). Agent-Based and Individual-Based Modeling: A Practical Introduction. *Language Testing*, 34(2), 291–293. <https://doi.org/10.1177/0265532216684576>
- Reynolds, C. W. (1999). Steering behaviors for autonomous characters. *Game Developers Conference*, 763–782. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(07\)61755-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(07)61755-3)
- Ronchi, E., & Kinsey, M. (2011). Evacuation models of the future: insights from an online survey of user's experiences and needs. *Advanced Research Workshop - Evacuation and Human Behaviour in Emergency Situations*, (October). Retrieved from <http://gala.gre.ac.uk/7054/>
- Santos, G., & Aguirre, B. E. (2004). A Critical Review of Emergency Evacuation Simulation Models. *Proceeding of Conference "Building Occupant Movement During Fire Emergencies,"* 339. Retrieved from [http://udspace.udel.edu/bitstream/handle/19716/299/PP\\_339.pdf?sequence=1](http://udspace.udel.edu/bitstream/handle/19716/299/PP_339.pdf?sequence=1)
- Shields, T. J., & Boyce, K. E. (2000). Study of evacuation from large retail stores. *Fire Safety Journal*, 35(1), 25–49. [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(00\)00013-8](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(00)00013-8)
- Silva, J. F. M., Almeida, J. E., Pereira, A., Rossetti, R. J., & Coelho, A. L. (2012). Preliminary Experiments With Eva - Serious Games Virtual.

- Smith, J. L. (2008). Agent-Based Simulation of Human Movements During Emergency Evacuations of Facilities. *Structures Congress*, 1–10. [https://doi.org/10.1061/41016\(314\)90](https://doi.org/10.1061/41016(314)90)
- Song, W., Xu, X., Wang, B. H., & Ni, S. (2006). Simulation of evacuation processes using a multi-grid model for pedestrian dynamics. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25766-7-42>
- Tan, L., Hu, M., & Lin, H. (2015). Agent-based simulation of building evacuation: Combining human behavior with predictable spatial accessibility in a fire emergency. *Information Sciences*, 295, 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.09.029>
- Treuille, A., Cooper, S., & Popović, Z. (2006). Continuum crowds. *ACM Transactions on Graphics*. <https://doi.org/10.1145/1141911.1142008>
- Wijermans, N., Jorna, R., Jager, W., Vliet, T. van, & Adang, O. (2013). CROSS: Modelling Crowd Behaviour with Social-Cognitive Agents. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 16(4)(1), 1–14. Retrieved from <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/16/4/1.html>
- Winter, H. (2012). *Modelling Crowd Dynamics During Evacuation Situations Using Simulation*.
- Xu, M., Wu, Y., Lv, P., Jiang, H., Luo, M., & Ye, Y. (2015). miSFM: On combination of Mutual Information and Social Force Model towards simulating crowd evacuation. *Neurocomputing*, 168, 529–537. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.05.074>
- Zheng, X., Zhong, T., & Liu, M. (2009). Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches. *Building and Environment*, 44(3), 437–445. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.04.002>
- Zhou, S., Chen, D., Cai, W., Luo, L., Low, M. Y. H., Tian, F., ... Hamilton, B. D. (2010). Crowd modeling and simulation technologies. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 20(4), 1–35. <https://doi.org/10.1145/1842722.1842725>