



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

# Sistema multiagente para caracterizar conglomerado de peatones en ambientes complejos

5 de enero del 2020

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

MUSTAFA ALI SABA

DIRECTOR DE TESIS: DR. JOSÉ ALEJANDRO RANGEL HUERTA

ASESOR: DR. GUILLERMO DE ITA LUNA



# Agradecimientos

A mi asesor, el Dr. José Alejandro Rangel Huerta, por su invaluable conocimiento y su guía para concluir este trabajo.

A mis profesores del posgrado de la Facultad de Ciencias Computacionales y a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por haberme brindado los conocimientos y formado como maestro en ciencias.

Al M.Cs. Rodolfo Ricaño Zúñiga por sus valiosos comentarios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico para culminar mis estudios.

# Resumen

En el siguiente trabajo de tesis se propone un sistema multiagente (*MAS*) para caracterizar el flujo de conglomerado de peatones para distintos ambientes complejos propuestos. El modelo utiliza un **conjunto de reglas de comportamiento** basadas en peatones reales, con el objeto de resolver el flujo para cada ambiente dado. El conglomerado es un sistema dinámico que evoluciona en el tiempo, el eventual uso de las reglas debe converger el sistema hacia la **auto-organización** a través de los efectos colectivos como: formación de veredas, franjas en intersecciones, flujos circulares, etc. Por otra parte, el flujo de la multitud se cuantifica en **diagramas fundamentales** como, la velocidad promedio y la actividad promedio del conglomerado. Para cada ambiente se tiene una **región crítica** de atasco diferente, en algunos ambientes los peatones tienen una mayor persistencia de flujo o un mejor uso de sus reglas (maniobrabilidad). Los ambientes son pasillos bidireccionales que aumentan en complejidad. Se tiene un corredor con obstáculos, un pasillo con salidas laterales, un pasillo fragmentado, otro pasillo con una rampa en el medio y por último, un pasillo de cruceo peatonal. La principal contribución de este trabajo es el modelo basado en agentes con la capacidad de resolver el flujo para estos nuevos ambientes propuestos.

# Abstract

In the following thesis work, a multi-agent system (MAS) is proposed in order to characterize the flow of pedestrian crowds for different complex environments like bidirectional hallways. The model agent uses a set of behavior rules based on real pedestrians, in order to solve the flow for each given environment. The crowd is a dynamic system that evolves over time, the eventual use of the rules must converge the system towards self-organization through collective effects such as: lane formation, stripes at intersections, circular flows, etc. On the other hand, the flow of the crowd is quantified in fundamental diagrams such as the average speed and the average activity of the overall crowd. For each environment there is a different critical jamming region, in some environments pedestrians have a greater persistence of flow or better use of its rules (maneuverability). The environments are bidirectional corridors that increase in complexity. There is a corridor with obstacles, a corridor with side exits, a fragmented corridor, another corridor with a ramp in the middle and finally, a pedestrian crossing corridor. The main contribution of this work is the agent-based model with the ability to solve the flow for these new proposed environments.

# Índice general

Índice de figuras	7
Índice de tablas	9
<b>1. Introducción</b>	<b>10</b>
1.1. Motivación . . . . .	13
1.2. Antecedentes . . . . .	13
1.3. Revisión de la literatura . . . . .	15
1.3.1. Clasificación de los modelos de peatones . . . . .	15
1.3.2. Efectos colectivos y auto-organización . . . . .	16
1.3.3. Modelado basado en agentes . . . . .	19
1.4. Planteamiento del problema . . . . .	22
1.5. Objetivos . . . . .	22
1.5.1. Objetivo general . . . . .	22
1.5.2. Objetivos específicos . . . . .	22
<b>2. Marco teórico</b>	<b>23</b>
2.1. Sistemas multiagente . . . . .	23
2.1.1. Teoría de agentes . . . . .	24
2.2. Modelado basados en agentes . . . . .	27
2.2.1. Sistemas complejos y emergimiento . . . . .	28
2.2.2. Ciclo de modelado . . . . .	29
2.2.3. Componentes de un modelo basado en agentes . . . . .	31
2.3. Dinámica de peatones . . . . .	33
2.4. Modelo del peatón . . . . .	35
2.5. Diagrama fundamental de flujo . . . . .	36

2.6. Entornos de simulación multiagente . . . . .	37
<b>3. Metodología</b>	<b>38</b>
3.1. Propuesta de investigación . . . . .	41
3.2. Diseño de entornos bidireccionales . . . . .	41
3.2.1. Pasillo simple bidireccional . . . . .	42
3.2.2. Pasillo con salidas laterales . . . . .	44
3.2.3. Pasillo fragmentado . . . . .	44
3.3. Diseño del sistema multiagente . . . . .	46
3.3.1. Percepción . . . . .	46
3.3.2. Toma de decisiones . . . . .	47
3.3.3. Actuación . . . . .	52
3.3.4. Proceso de caminata . . . . .	53
<b>4. Resultados</b>	<b>54</b>
4.1. Configuración de los experimentos . . . . .	54
4.2. Pasillo estándar . . . . .	55
4.3. Pasillo con salidas laterales . . . . .	56
4.4. Pasillo fragmentado en dos . . . . .	57
<b>5. Conclusiones y trabajo a futuro</b>	<b>65</b>
<b>Referencias</b>	<b>68</b>

# Índice de figuras

1.1. Escenarios de conglomerados y flujo de peatones en el mundo real. . . . .	11
1.2. Efectos colectivos y auto-organización . . . . .	18
2.1. El agente actúa en el ambiente donde percibe y lleva a cabo decisiones de manera cíclica y autónoma. . . . .	25
2.2. Estructura de un sistema multiagente. Adaptado de (Jennings, 2000). . . . .	28
2.3. El ciclo de modelado y diseño. Recuperado de Railsback y Grimm (2019). . . . .	30
3.1. Diagrama que muestra el flujo de trabajo del simulador. . . . .	39
3.2. Interfaz del simulador con todos sus componentes. . . . .	40
3.3. El mundo de NetLogo <sup>®</sup> está hecho de celdas o parcelas. . . . .	42
3.4. Mundo cuadriculado de NetLogo <sup>®</sup> . . . . .	42
3.5. Estructura del pasillo simple bidireccional. . . . .	43
3.6. Estructura del pasillo bidireccional con salidas laterales. . . . .	45
3.7. Estructura del pasillo bidireccional fragmentado en dos partes. . . . .	45
3.8. Campo perceptual del peatón. . . . .	47
3.9. Situaciones de percepción por un peatón a través de su campo perceptual. . . . .	48
3.10. Reglas de evasión. . . . .	50
3.11. Reglas de evasión compuestas. . . . .	51
3.12. Reglas de evasión combinadas. . . . .	51
3.13. Reglas de evasión para peatones desalineados. . . . .	52
4.1. Evolución en el tiempo de los peatones para el <b>pasillo estándar</b> . Alrededor de 350 peatones comienzan a formarse atascos en el pasillo. . . . .	55
4.2. velocidad promedio <i>vs</i> densidad para el pasillo estándar. . . . .	56
4.3. Diagrama de actividad para el pasillo estándar. . . . .	57

4.4. En el **pasillo con salidas laterales** los peatones tienen una tendencia más hacia formar veredas de seguimiento. . . . . 58

4.5. velocidad promedio *vs* densidad para el pasillo con salidas laterales. . . . . 59

4.6. Diagrama de actividad para el pasillo con salidas laterales. . . . . 60

4.7. Muestra la evolución de los peatones para el **pasillo fragmentado**, en (d) se observa un patrón de atasco. . . . . 62

4.8. velocidad promedio *vs* densidad para el pasillo fragmentado. . . . . 63

4.9. Diagrama de actividad para el pasillo fragmentado. . . . . 63

4.10. Diagrama fundamental de flujo para la velocidad promedio *vs* densidad de los tres pasillos. . . . . 64

4.11. Diagrama de actividad para los tres pasillos. . . . . 64

# Índice de tablas

1.1. Se reportan algunos de los incidentes de los últimos cinco años, en relación a estampidas humanas. Una de las motivaciones principales en estudios sobre dinámica de multitudes ( <i>Dr. Ali Asgary, York University, 2020</i> ). . . . .	12
4.1. Tabla comparativa con respecto al pasillo bidireccional estándar. . . . .	61

# Capítulo 1

## Introducción

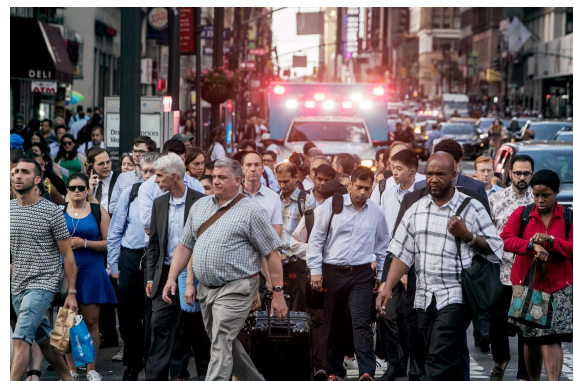
La caminata de multitudes o conglomerados de peatones humanos es un fenómeno inherente de la teoría de los sistemas complejos adaptativos que tiene lugar en el mundo natural y que ocurre con normalidad en ambientes o espacios sociales. En particular, en sociedades humanas poblacionalmente densas en donde multitudes de peatones se conglomeran formando distintas dinámicas interesantes. Estas dinámicas son estudiadas ampliamente por diversas comunidades científicas, como teóricos en sistemas complejos: físicos, matemáticos, científicos de la computación, científicos sociales, biólogos de sistemas, o inclusive ingenieros civiles y diseñadores de espacios urbanos, entre otros expertos (véase por ejemplo Anna y cols., 2017; Gilbert y Troitzsch, 2005; Henderson, 1974; Helbing y Molnar, 1998). Así, el estudio de la dinámica de peatones es de carácter multidisciplinario y las interacciones colectivas a gran escala, y formación de patrones emergentes a través del tiempo, son de interés común para los investigadores en todo el mundo.

Dentro de la comunidad científica y de la ingeniería, se pueden distinguir un conjunto de aplicaciones que surgen a partir de los estudios en la variedad de formas de *auto-organización* del fenómeno de la dinámica de peatones. Entre estos efectos colectivos como: la formación de veredas bidireccionales, las oscilaciones en cuellos de botella, los patrones en intersecciones o el comportamiento de pánico en la multitud, permiten adquirir una intuición para el diseño de espacios urbanos, y comprender mejor las situaciones de pánico o crisis en escenarios con multitudes que en ocasiones conllevan a estampidas humanas mortales, la optimización de procesos de evacuación, procesos logístico, ambientes programables de simulación, o inclusive la recolección de información para sistemas de software de asistencia inteligente.

Algunos escenarios de interacciones colectivas a gran escala, pueden observarse en la figura 1.1, estos ejemplos del mundo real muestran la complejidad en estos sistemas de muchas partículas. En la figura 1.1a se muestra una de las avenidas mas pobladas en el mundo, el cruce peatonal de Shibuya en Tokio, Japón<sup>1</sup>. Donde alrededor de miles de peatones se encuentran en flujos bidireccionales a hora pico. Otro encuentro peatonal bastante denso es el de la séptima avenida en el centro de la ciudad de Manhattan, Nueva York<sup>2</sup> (véase la figura 1.1b). El espacio peatonal es reducido para la cantidad de peatones que atraviesan, de esta manera, las personas se impacientan. De esta forma, el fenómeno colectivo es influenciado por aspectos culturales, factores psicológicos, el género o por posibles fluctuaciones y variaciones en la densidad del flujo de peatones, o por la geometría de los espacios o ambientes en donde los peatones interactúan conjuntamente.



(a) Cruce peatonal de Shibuya, Tokio. Uno de los cruces peatonales mas sobrepoblados del mundo. (*Joshua Mellin, CNN Travel, 2019*).



(b) Flujo peatonal en la séptima avenida del centro de la ciudad de Manhattan, Nueva York. (*Victor J. Blue, para The New York Times, 2016*).

Figura 1.1: Escenarios de conglomerados y flujo de peatones en el mundo real.

Sin embargo, existen otros escenarios de estudio donde se tienen situaciones de riesgo que pueden darse por distintas razones como accidentes, derrumbamientos o incendios, desesperación colectiva, etc. Esto puede desembocar en perdidas humanas masivas. La tabla 1.1 muestra las tragedias que han ocurrido en los últimos años debido a estampidas humanas. Los trabajos de investigación sobre estampidas humanas forman parte de una categoría distinta denominada dinámica de evacuación de peatones, que involucra otros elementos en el diseño de modelos de simulación (Bakar y cols., 2010). Para un registro mas completo de la

---

<sup>1</sup><https://edition.cnn.com/travel/article/shibuya-crossing-tokyo-japan/index.html>

<sup>2</sup><https://www.nytimes.com/2016/07/01/nyregion/new-york-city-overcrowded-sidewalks.html>

tabla anterior, es posible acceder a información geográfica<sup>3</sup> de estos acontecimientos.

Año	Lugar	Evento	Muertes	Causa
2020	Irán	Funeral de alto mando militar	59	Congestión
2020	Kenya	Escuela primaria	14	Pánico/agresión
2019	Brasil	Entretenimiento	9	Persecución
2019	Irak	Religioso	31	Falla estructural
2019	Angola	Partido de fútbol	17	Estampida
2018	Bangladesh	Cobro de salario	10	Estampida/pánico
2018	Venezuela	Club social	19	Agresión
2017	India	Estación de tren	23	Espacio reducido
2017	Italia	Partido de fútbol	2	Pánico
2017	Honduras	Estadio de fútbol	4	Congestión
2015	Rumania	Club nocturno	64	Incendio
2015	Arabia Saudita	Congregación religiosa de Hajj	2400	Desconocido

Tabla 1.1: Se reportan algunos de los incidentes de los últimos cinco años, en relación a estampidas humanas. Una de las motivaciones principales en estudios sobre dinámica de multitudes (*Dr. Ali Asgary, York University, 2020*).

Se han llevado a cabo experimentos con multitudes de peatones reales y se han obtenido resultados *cualitativos* y *cuantitativos*. Estos son útiles para tener una mayor comprensión del comportamiento de la multitud ya sea para situaciones de riesgo o de la vida cotidiana. Esta información es importante para el desarrollo de modelos de simulación realistas los cuales pueden ser *validados* y *probados* con información real.

La información cualitativa se da a través de los *efectos colectivos* que se forman a una escala macroscópica del sistema. Estos efectos son el resultado de la *auto-organización* del sistema complejo de multitudes de peatones en un ambiente dado. Por otra parte, los resultados cuantitativos son más difíciles de obtener. Estos pueden observarse a través de *gráficas del rendimiento* del sistema; como lo es el *diagrama fundamental del flujo* del conglomerado.

<sup>3</sup>World Crowd Disasters: <https://arcg.is/1jbnCL>

## 1.1. Motivación

Se ha trabajado anteriormente con un modelo basado en agentes (ABM por sus siglas en inglés) para simular un conglomerado de peatones para un corredor o pasillo simple bidireccional (véase Ballinas-Hernández y cols., 2011), para el cuál presumiblemente se caracteriza el flujo de manera cuantitativa a través de gráficas de velocidad promedio y actividad promedio. Sin embargo, en el trabajo antes mencionado no se contemplan otros escenarios bidireccionales.

Una de las motivaciones clave de este nuevo proyecto es observar como se modifican los patrones de efectos colectivos para los nuevos pasillos, como varía el flujo para cada escenario y como se desempeñan las reglas que aplican los peatones para resolver encuentros, la cuál se cuantifica en el diagrama de actividad promedio.

Otro aspecto que motiva este trabajo es observar los cambios en la región crítica de formación de atascos para las gráficas de rendimiento. Es decir, para cada pasillo el patrón de atasco se forma de manera distinta, esto nos permite distinguir en que ambiente se da mejor el flujo de peatones, y en que otro se puede presentar riesgo de saturación. Este último aspecto se podría presentar como trabajo a futuro.

## 1.2. Antecedentes

El estudio de la dinámica de peatones y los modelos de conglomerados de peatones parten de la observación real del fenómeno a través de estudios empíricos. Los primeros estudios empíricos se remontan a unas seis décadas atrás (Fruin, 1971; Hankin y Wright, 1958; Navin y Wheeler, 1969), estos estudios son meramente experimentales y se enfocan mas bien en la caracterización del flujo y diseño de espacios peatonales, mas que en el diseño de modelos de simulación.

Henderson (1974) presenta un modelo teórico para el flujo de peatones basado en la hidrodinámica. Muestra que la multitud de peatones puede exhibir un comportamiento de tipo gas cinético.

En el trabajo de Ciolek (1978) se presenta un estudio experimental centrado en la formación

de patrones espaciales y en la toma de decisiones para elección de rutas. Hace mención de una serie de criterios de caminata que son comunes para todos los peatones como: elegir el camino mas corto, los peatones evitan los ambientes sobre-poblados y dejan una distancia de 60cm o mas con respecto a otro peatón. Entre otros aspectos sociales.

La investigación de Helbing y Molnar (1998) propone un modelo basado en un mecanismo de fuerza social. Este es un trabajo puramente físico. se proponen términos de fuerzas que actúan sobre los peatones individualmente. En particular se tiene la fuerza de aceleración que actúa hacia la velocidad de movimiento deseado del peatón, por otro lado se tiene una fuerza que repele y evita la colisión entre un borde u otro peatón cercano, y finalmente la fuerza para efectos de atracción. Las ecuaciones de movimiento que resultan, son ecuaciones no lineales de tipo Langevine. Siendo esta última, una ecuación diferencial estocástica que describe la evolución en el tiempo del colectivo.

Otro enfoque importante es el del modelo de autómata celular de Schadschneider y cols. (2001). Ellos proponen un modelo de autómata celular de dos dimensiones para simular el trafico peatonal para un pasillo bidireccional. Se hace uso de un concepto teórico conocido como *floor-field* que consiste de una matriz de campo. El peatón tiene asociada esta matriz que deja un rastro virtual para los demás peatones. Este concepto matemático permite la formación de veredas y la auto-organización.

Posterior a estos, se tienen los modelos basados en agentes que permiten modelar sistemas complejos de muchas partículas. Algunos de ellos como los de Ronald y cols. (2007), el cuál propone un modelo basado en agentes con una arquitectura BDI (belief-desire-intention), la cuál es útil para la toma de decisiones de alto nivel.

El trabajo de Rangel-Huerta y Muñoz-Meléndez (2010) es fundamental para el proyecto de tesis. En este trabajo se propone un modelo de agente situado basado en comportamientos. El agente es autónomo, percibe su ambiente, toma decisiones y actúa. En este trabajo se define una función de probabilidad para describir el flujo de la multitud. En el trabajo posterior de Ballinas-Hernández y cols. (2011) se presenta un modelo basado en agentes inspirado en la teoría cinética de los sistemas vivientes. Se evalúan gráficas de desempeño para un corredor simple bidireccional. Este es un antecedente directo del siguiente trabajo de tesis.

## 1.3. Revisión de la literatura

En la literatura de la simulación y la dinámica de peatones se identifican tres escalas (granularidad) distintas de modelado. Los modelos microscópicos, que describen la dinámica a nivel individual. Los modelos macroscópicos donde la multitud de peatones se caracteriza a través de cantidades promedio. e.g., la cuantificación de flujo promedio de la multitud, y por último, los modelos mesoscópicos o cinéticos. Estos últimos trabajan con información intermedia, entre la escala microscópica y la macroscópica. Este modelo considera a los peatones por individual, pero el comportamiento se describe a través de las relaciones con los demás peatones.

La distinción de estos modelos es importante porque permite un nivel de diseño y de abstracción conveniente para el problema de simulación. A continuación se describe y se exploran las características principales para cada una de estas escalas. Para una información mas completa del tema (véase Cristiani y cols., 2014, pp. 73–94). En este se describe a detalle cada uno de los modelos que constituyen estas escalas de abstracción y modelado.

### 1.3.1. Clasificación de los modelos de peatones

#### Escala microscópica

En la dinámica de multitudes, la escala microscópica corresponde al análisis individual de un peatón, el cuál es el componente atómico de la multitud. Los modelos matemáticos a esta escala describen el movimiento de un peatón en términos de sus variables de estado. Si el modelo es diferencial, i.e., se describe a través de ecuaciones diferenciales ordinarias, entonces las variables de estado pueden ser la posición y la velocidad dependientes del tiempo. Por otra parte si el modelo es basado en agentes, como los autómatas celulares; las variables de estado son discretas.

#### Escala macroscópica

La escala macroscópica es todo lo opuesto a la escala anterior. Esta ya no se enfoca en un solo individuo, sino en una distribución promedio de todos los peatones, la cuál se describe en términos de la densidad en el ambiente y depende del tiempo. La interacción bajo este enfoque se puede describir a través del flujo promedio de una multitud. Los modelos pueden

formularse a través de ecuaciones diferenciales parciales, tomando el tiempo y el espacio como variables independiente.

En el marco de referencia macroscópico los peatones se distinguen como una masa colectiva, y se identifica por un observador. Los peatones ocupan puntos arbitrarios en el espacio, de modo que la densidad del colectivo se define como el límite de la razón entre el número de personas contenidas en un volumen de referencia centradas en un punto  $x$ , y el volumen mismo cuando tiende a 0. Donde  $\rho$  es la densidad.

$$\rho(x) = \lim_{\text{volumen} \rightarrow 0} \frac{\text{número de peatones en el volumen}(x)}{\text{volumen}(x)}$$

### Escala mesoscópica

La escala mesoscópica o cinética es mas bien una escala de representación, mas que de descripción. Esta escala se basa en el concepto de *distribución estadística* de los estados de los peatones. Esta distribución forma una representación intermedia en comparación a la información de cantidades físicas como la posición o la velocidad de un peatón a escala microscópica, o a la densidad a escala macroscópica. Tal distribución se describe como una *función de distribución*, la cuál se denota como  $f$ . Por ejemplo, si el estado microscópico del peatón se constituye por el par  $(x, v)$ , donde  $x$  es la posición y  $v$  es la velocidad, entonces  $f(x, v, t)$  es la función de distribución, y  $t$  es el tiempo.

El enfoque mesoscópico para el modelado de sistemas complejos se originó con la teoría cinética de los gases de Ludwig Boltzmann a finales de 1800. Esta perspectiva mesoscópica permite observar el sistema físico desde un punto de vista microscópico, el cuál es útil para trabajar con sistemas compuestos por la interacción de muchas elementos. Por otra parte, no requiere de modelar cada peatón por individual, sin embargo este modelo no provee de manera directa cantidades macroscópicas promedio. Se obtienen a posteriori de manera estadística a partir de la función de distribución.

#### 1.3.2. Efectos colectivos y auto-organización

El movimiento en masa de multitudes de peatones es un fenómeno complejo interconectado, que tiene comportamientos emergentes a través del tiempo. Estos comportamientos ocurren de manera natural en la multitud, independientemente del conocimiento a priori

de los individuos, señales peatonales, o incluso la intervención de algún oficial de la ley; como un oficial de tránsito. Es decir, no se tiene ningún consenso previo y los patrones espacio-temporales emergen naturalmente.

Un fenómeno que ocurre con bastante naturalidad y que es muy sencillo de observar en multitudes es la *formación de veredas* para peatones en contraflujo. Cuando dos grupos de personas se mueven de manera opuesta se forman veredas que varían de manera dinámica con respecto al tiempo, estas se forman cuando las personas se mueven en una sola dirección a densidades considerablemente altas, los encuentros peatonales se reducen y se alcanza una mayor velocidad de caminata o circulación. Esta es una forma de auto-organización no consensuada. La figura 1.2a muestra este patrón de formación. En las veredas sombreadas de rojo se muestra a los peatones con dirección hacia la derecha, y los peatones en sombra azul se dirigen hacia la izquierda.

Los efectos colectivos de formación de veredas se dan en situaciones normales de caminata (no hay pánico). Estos patrones coordinados o cooperativos se originan a través de movimientos simples. Lo que lleva a un comportamiento colectivo inteligente. Cualquier modelo bien especificado debe ser capaz de reproducir al menos alguno de estos efectos.

Otro efecto que se da a densidades muy altas es el *fenómeno de obstrucción y atascos*. Estos dependen de la densidad y de la estética del espacio donde los peatones fluyen. Los atascos se forman cuando el número de peatones que fluyen sobrepasa la capacidad en un metro cuadrado de espacio. Los escenarios con capacidad muy reducida son llamados cuellos de botella. En la figura 1.2b se muestra este fenómeno de atasco. En este ambiente el flujo peatonal se estabiliza y los peatones se estancan, posteriormente se forman interferencias de desatasco, si el ambiente lo permite, o se forman cuellos de botella en corredores estrechos. En la figura 1.2c se muestra un clásico cuello de botella. Este tipo de fenómeno puede conducir a un *escenario fatal* si se produce un incidente como un incendio, un terremoto, etc.

En ocasiones los ambientes reales pueden presentar dificultades para la observación de estos patrones donde se involucran a una gran cantidad de peatones, o en la introducción de instrumentos avanzados para la recopilación de datos. Esta es una de las principales razones por las cuales los investigadores en el área, han optado por ambientes artificiales.



Figura 1.2: Efectos colectivos y auto-organización

La *formación de franjas en diagonal* es otro patrón de formación colectiva que ocurre en la intersección de dos corrientes peatonales. Esta formación permite a los peatones atravesar otra corriente peatonal sin la necesidad suspender la caminata. Algunos autores como Cividini y cols. (2013); Helbing y cols. (2005); Hoogendoorn y Bovy (2002); Hughes (2003) describen y analizan estos efectos. Este tipo de patrón no es trivial en un escenario real y se ha optado por ambientes artificiales para reproducirlos. La figura 1.2d muestra los efectos de este tipo de patrón para flujo de intersecciones.

Otro patrón interesante en la intersección de dos corrientes peatonales es el cuello de botella. En la figura 1.2e se muestra este fenómeno de saturación para un ambiente artificial. En el trabajo reciente de Aghabayk y cols. (2020) se muestra este fenómeno para diferentes ángulos

en la intersección de estas dos corrientes peatonales. Muestran que para un ángulo agudo de  $30^\circ$  el flujo mejora, mientras que en uno obtuso de  $150^\circ$  el flujo peatonal tiende a saturarse.

Otros patrones de formación como las *caminatas grupales*, *cúmulos de peatones* y *formaciones en tipo V* también están presentes en los efectos colectivos de auto-organización de la multitud. La figura 1.2f muestra algunas de estas formaciones. En el trabajo de Moussaïd y cols. (2010), se identifican estos patrones y muestran que la formación de peatones en tipo V facilita la interacción social en grupos, sin embargo reduce el flujo debido a la forma poco aerodinámica. De esta forma, hay un intercambio entre comodidad o mejoramiento de flujo en la multitud.

Algunos de estos efectos colectivos sobrepasan el alcance de nuestra investigación, debido a que nuestro trabajo se limita únicamente a caracterizar el flujo del conglomerado para ciertos ambientes virtuales. No nos enfocamos en reproducir cada uno de estos efectos que forman parte de la investigación científica con peatones y escenarios reales. Nuestro modelo es capaz de reproducir de manera satisfactoria solo algunos de estos patrones macroscópicos.

### 1.3.3. Modelado basado en agentes

En décadas anteriores, el modelado basado en agentes (ABM) ha sido bastante prometedor como metodología de diseño para la simulación de conglomerados de peatones. La ventaja que tienen estos modelos es que se ajustan bien a problemas complejos que involucran la interacción de muchas partículas y procesos de toma de decisiones discreta, como también el uso de técnicas de aprendizaje automático en combinación. Muchos autores desarrollan sus modelos basados en agentes con diferente nivel de sofisticación.

El diseño y la granularidad es a nivel del peatón, que es el agente embebido en el ambiente. Algunos modelos hacen uso de módulos de memoria para guardar información de preprocesamiento y utilizar cierto conocimiento para efectuar decisiones, sin embargo esto tiene un costo computacional que se debe discutir en la fase de diseño.

Batty y cols. (1998) presentan un modelo de flujo peatonal basado en agentes para simular la interacción de peatones en un centro comercial idealizado y otros puntos de establecimiento públicos. Este modelo ocupa cinco componentes de diseño; atracción hacia establecimientos,

caminata hacia adelante, evasión de obstáculos locales, umbrales que restringen congestión y movimiento influenciado por la mayoría. El modelo se implementa como un autómata celular y se compara con información experimental con objeto de calibración.

La investigación de Jiang (1999) presenta un enfoque puramente multiagente para la simulación de peatones en espacios urbanos. Analiza como la morfología de los espacios urbanos tiene un efecto considerable en el desempeño del flujo de peatones.

Dijkstra y cols. (2001) presentan un modelo híbrido que combina la idea de autómata celular junto con la tecnología de agentes para la visualización del comportamiento peatonal. El espacio que ocupa un peatón es especificado a través de una malla como un autómata celular para percibir información local, así como su vecindad. Los peatones son vistos como agentes, y el comportamiento se modela a través de autómatas celulares. Se realiza una simulación 3D de un centro comercial.

Ronald y cols. (2007) investiga el comportamiento que puede exhibir un peatón a través de la arquitectura de diseño de los agentes de tipo BDI (*belief-desire-intentions*), que constituye una de las formas de programación orientada a agentes para la toma de decisiones de alto nivel.

Todos estos modelos anteriores tratan con ambientes complejos a gran escala. Simulan escenarios de la vida cotidiana, como centros comerciales, infraestructuras con muchas entradas y salidas e intersecciones. Otros modelos se enfocan en escenarios más simples como pasillos o ambientes con intersecciones simples o pasillos en contraflujo, con el objeto de observar las características de formación de patrones para densidades críticas. Es decir, para un elevado número de peatones.

El enfoque basado en agentes o multiagente ha tomado distintas directrices, algunos modelos trabajan sobre escenarios o ambientes a gran escala y dejan a un lado las dinámicas emergentes a nivel local, como algunos de los trabajos anteriormente mencionados. Por otra parte, existen formulaciones de modelos para escenarios mas minimalistas, pero que dejan ver los patrones emergentes que se dan para variaciones simples como el ancho entre las paredes de un pasillo, o la intersección de dos pasillos. Estos patrones geométricos son el resultado de un proceso de auto-organización del sistema.

Los modelos que presentan Ballinas-Hernández y cols. (2011); Rangel-Huerta y Muñoz-Meléndez (2010) son modelos basados en agentes que se encuentran situados o embebidos en el ambiente. Los agentes en estos modelos perciben información local del ambiente y dependiendo de las condiciones, toman decisiones basadas en un conjunto de reglas de acción. Esto permite resolver conflictos o situaciones de colisión para peatones en contraflujo. Así, el agente peatón tiene una dinámica de percepción, toma de decisiones discretas y una función de acción que le permite resolver encuentros directos en el ambiente para alcanzar su objetivo o meta final. Desde una visión macroscópica se observan patrones emergentes de auto-organización. Este modelo considera peatones heterogéneos (i.e., peatones que cambian su perfil de velocidad de caminata). Algunos son peatones apresurados, y otros peatones pasivos en su caminata.

Heliövaara y cols. (2012) presentan un modelo de agentes para distintos encuentros bidireccionales e intersecciones, como también un escenario crítico de evacuación. Este modelo se enfoca en el comportamiento de los agentes para situaciones en contraflujo, ya que los agentes toman decisiones de evasión a partir de la información que perciben de los agentes con dirección contraria. El modelo integra una formulación de fuerza social para describir la dinámica del flujo para el corredor o para el momento de evacuación. Los parámetros físicos del modelo fueron evaluados con simulaciones Monte Carlo.

Dai y cols. (2013) proponen un modelo basado en agentes para simular el flujo bidireccional en situaciones de evacuación. En este modelo consideran cuatro fuerzas principales que dictaminan la dirección de movimiento peatonal: una fuerza gradiente, una fuerza de repulsión, resistencia y una fuerza aleatoria. La rapidez de los agentes esta determinada por la rapidez del líder que dirige el campo gradiente.

Hussein y Sayed (2017) proponen un modelo microscópico basado en agentes. En este modelo, los agentes pueden dirigirse con precisión y resolver encuentros frontales a través del uso de una serie de reglas equiparables con peatones reales. Los autores implementan un algoritmo genético con el objeto de calibrar y ajustar los parámetros del modelo. Ocupan técnicas de visión por computadora para la extracción de rasgos para peatones reales. Este trabajo no se enfoca meramente en el ambiente, sino en los encuentros frontales de los peatones, y en enmarcar el modelo con información real.

## 1.4. Planteamiento del problema

En los trabajos realizados previamente por Ballinas-Hernández y cols. (2011); Rangel-Huerta y Muñoz-Meléndez (2010) se desarrolló un modelo microscópico basado en agentes situados para simular el flujo de multitudes de peatones para un pasillo bidireccional. Los agentes hacen uso de un repertorio de reglas o condiciones para resolver encuentros frontales y laterales con peatones o con las paredes del pasillo, como también encuentros mixtos (i.e., encuentros combinados con peatones y pared). Los peatones se encuentran en contraflujo y se evalúa el rendimiento para un solo pasillo. Sin embargo no se consideran otras formas complejas de pasillos bidireccionales.

## 1.5. Objetivos

### 1.5.1. Objetivo general

El objetivo del proyecto consiste en desarrollar un sistema multiagente para describir conglomerados o multitudes de peatones en ambientes complejos. Los ambientes complejos son pasillos bidireccionales dibujados sobre un mundo en dos dimensiones. El sistema multiagente deberá ser capaz de resolver el flujo de manera autónoma. Resolver el flujo significa que deberá existir una zona crítica de atasco, que depende del ancho del pasillo y del número de agentes que se encuentran embebidos en el corredor.

### 1.5.2. Objetivos específicos

1. Diseñar un sistema multiagente con base en reglas de caminado capaces de navegar en ambientes complejos.
2. Implementar la simulación del conglomerado en diferentes ambientes.
3. Interpretar los resultados en términos de parámetros colectivos de flujo de caminado.

# Capítulo 2

## Marco teórico

La siguiente sección comprende la definición de los conceptos y elementos fundamentales que constituyen este trabajo. En primer lugar, se explica que es la teoría de los sistemas multiagente y se da la definición formal de agente que es el componente principal de este proyecto. Se describe que es un modelo basado en agentes con el objeto de comprender el alcance que tiene en la investigación de los sistemas complejos. Se explica en que consiste la investigación de la dinámica de peatones a grandes rasgos, posteriormente definimos de manera formal nuestro modelo de peatón, que es lo que se implementa en un lenguaje de programación. Se explica que es el diagrama fundamental de flujo, los ambientes de simulación que existen y las características y ventajas de NetLogo<sup>®</sup>, como también la programación basada en agentes.

### 2.1. Sistemas multiagente

Los sistemas multiagente (**MASs**) son una subárea de estudio en la inteligencia artificial distribuida (**DAI**) que ha estado en constante desarrollo desde finales de 1970. El área de los **MASs** es de naturaleza multidisciplinaria y encuentra sus raíces en los campos de la sociología, la economía, la etología y las ciencias cognitivas, etc.

El estudio de los **MASs** se centra en la capacidad para resolver problemas descentralizados, procesar información paralela en sistemas tecnológicos y la adaptabilidad que tienen para resolver o describir sistemas complejos —*robótica colaborativa, redes complejas y sistemas a gran escala*— donde se ha mostrado la versatilidad de este enfoque de la inteligencia artificial.

### 2.1.1. Teoría de agentes

Antes de definir formalmente que es un sistema multiagente, debemos dar una definición del termino **agente**. Una definición bastante aceptable es la de Weiss (2013, Capítulo 1):

#### Agente

*Un **agente** es un sistema de computadora que se encuentra situado en un **ambiente**, y que es capaz de realizar **acciones de manera autónoma** en este ambiente con el objeto o propósito de alcanzar su tarea u **objetivo** asignado.*

Donde:

**Ambiente:** es el espacio donde el agente se encuentra, este percibe información y lleva a cabo acciones que a su vez, modifican el ambiente mismo formando un ciclo de retroalimentación.

**Autonomía:** se refiere a que el agente puede tomar decisiones sin la influencia de un observador externo. Esto es, el agente toma decisiones a partir de la información que percibe del ambiente o de los demás agentes en su campo de visión.

**Objetivo o tarea:** esto es lo que el agente pretende alcanzar o cumplir tomando la mejor decisión.

La figura 2.1 muestra un diagrama de como interactúa el agente en su ambiente. El agente realiza un proceso cíclico de retroalimentación que a su vez, modifican el estado actual del ambiente.

#### Agente inteligente

Wooldridge y Jennings (1995) sugieren un conjunto de propiedades que un agente debe exhibir para que pueda ser competentemente inteligente:

1. **Reactividad:** Los agentes inteligentes perciben su ambiente y reaccionan a los cambios que se dan en este, en un tiempo aceptable. Esto, con el propósito de cumplir sus objetivos de diseño.

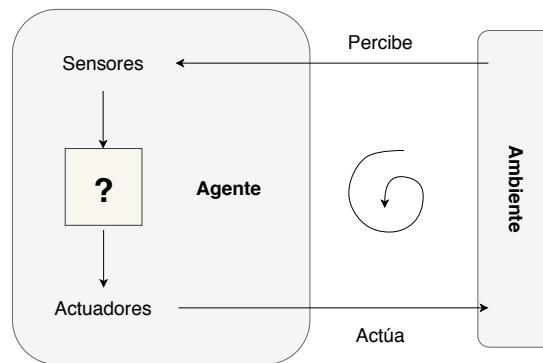


Figura 2.1: El agente actúa en el ambiente donde percibe y lleva a cabo decisiones de manera cíclica y autónoma.

2. **Proactividad:** Los agentes inteligentes deben exhibir comportamientos orientados al objetivo o tarea, esto es, deben ser proactivos o tener iniciativa propia. Todo esto con el objeto de cumplir o alcanzar los objetivos delegados en su diseño.
3. **Habilidad social:** Los agentes inteligentes deben ser capaces de interactuar con otros agentes (y posiblemente con personas). Esto, con el objeto de alcanzar el objetivo de diseño.

Estos son los principios de diseño que se deben considerar en la construcción de un agente inteligente. Sin embargo, el desempeño del agente está vinculado al tipo de ambiente (i.e., si el ambiente es muy complicado, el desempeño del agente se verá mermado). Algunos ambientes son más difíciles que otros. Russell y Norving (2002, pp. 43–44) proponen una categorización de tipos de ambientes para agentes individuales o sistemas multiagente.

### Tipos de ambientes

Un ambiente multiagente puede ser competitivo, colaborativo o combinar ambos casos.

**Completamente observable vs. Parcialmente observable:** Si la percepción de un agente es capaz de percibir o acceder a todos los estados del ambiente en cada momento en el tiempo, entonces el ambiente es completamente observable. En otro caso si el agente no tiene acceso completo a todo el espacio perceptual en cada instante, entonces el ambiente es parcialmente observable. Si el agente no puede percibir, entonces es inobservable.

**Mono-agente vs. Multi-agente:** Cuando el ambiente está constituido por un solo agente, entonces el ambiente es mono-agente, si el ambiente involucra a dos agentes o a mas, entonces el ambiente es multi-agente.

**Determinístico vs. Estocástico:** Cuando el siguiente estado del ambiente está determinado completamente por el estado actual del ambiente y por la acción que ejecuta el agente, entonces se dice que el ambiente es determinista; de lo contrario, es estocástico.

**Episódico vs. Secuencial:** En un ambiente episódico las actividades que lleva a cabo el agente se dan por episodios. Es decir, la experiencia del agente se divide en episodios y los resultados anteriores no afectan las decisiones siguientes del agente en su ambiente. En el caso de un ambiente secuencial, las tareas actuales del agente afectarán las tareas futuras.

**Estático vs. Dinámico:** Si el ambiente cambia con el paso del tiempo mientras que el agente está deliberando, entonces se dice que el ambiente es dinámico; de no ser así, entonces es estático. El ambiente también puede ser semiestático, si este no cambia, pero el rendimiento del agente si varía.

**Discreto vs. Continuo:** Cuando el número de acciones y objetos que pueden percibirse en el ambiente es finito y bien definido, entonces el ambiente es discreto. De lo contrario, el ambiente es continuo.

### Arquitecturas de agentes

Se han formulado una serie de arquitecturas para trabajar con agente, que proveen de ciertas funciones para situaciones específicas. La arquitectura es la encargada de relacionar la percepción y la acción de un agente, es decir; de como decide el agente o agentes. Estas se clasifican de la siguiente manera.

**Arquitecturas basadas en lógica:** Las decisiones que toma el agente son hechas a partir de deducciones lógicas.

**Arquitecturas reactivas:** La toma de decisiones se implementa como un mapeo directo de situación-acción.

**Arquitecturas BDI (belief-desire-intention):** Las decisiones dependen de la manipulación de estructuras de datos muy elaboradas que representan las creencias, deseos e intenciones del agente.

**Arquitecturas por capas:** La toma de decisiones se realiza a través de varias capas de software. Cada capa está elaborada pensando en el ambiente, en diferentes niveles de abstracción.

### Sistema multiagente

Un sistema multiagente (**MAS**) es un sistema compuesto de múltiples agentes inteligentes que interactúan para resolver problemas que están mas allá de la capacidad individual de un solo agente. Los **MAS** son caracterizados como sistemas donde:

1. Cada agente tiene información o capacidad incompleta para resolver el problema o tarea en cuestión. Tienen una visión limitada.
2. No existe un control global del sistema.
3. Los datos son descentralizados, por lo tanto el sistema también lo es.
4. Los cálculos son asíncronos.

La figura 2.2 muestra la estructuración y organización de un sistema multiagente convencional. Cada agente tiene un *campo de influencia* sobre el ambiente; esto es aquello de lo que el agente tiene control o que puede influenciar en el ambiente. Las intersecciones o coincidencias de estos campos de influencia entre agentes pueden dar lugar a relaciones de dependencia entre agentes.

## 2.2. Modelado basados en agentes

El modelado basado en agentes (**ABM**) es una metodología que nace de la investigación en sistemas complejos, y que busca analizar y comprender problemas complejos a través del diseño de modelos y experimentos de simulación por computadora a través de la teoría de agentes.

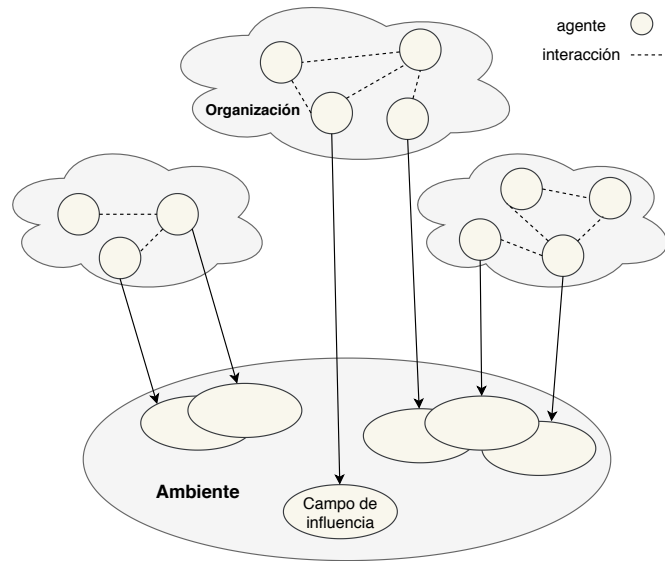


Figura 2.2: Estructura de un sistema multiagente. Adaptado de (Jennings, 2000).

### 2.2.1. Sistemas complejos y emergimiento

La teoría de los sistemas complejos desarrolla un conjunto de principios y herramientas para describir la complejidad en fenómenos naturales. Un sistema complejo es un sistema compuesto por muchos elementos que interactúan entre ellos, cuyas propiedades de agregación o comportamiento no es perceptible desde el punto de vista de los propios elementos en el sistema.

A través de la interacción de esta multitud distribuida de elementos en un sistema surge el *fenómeno emergente*, que es característico de un sistema complejo. Wilensky y Rand (2015) definen el fenómeno emergente como *el surgimiento de estructuras novedosas y coherentes, patrones, y propiedades a través de las interacciones de múltiples elementos distribuidos*.

Estas estructuras emergentes surgen de las interacciones y propiedades de los elementos del sistema en cuestión y forman un ciclo de retro-alimentación con estos elementos. El surgimiento de patrones espontáneos a nivel global se debe a una estructuración de reglas a un micro nivel. El resultado de estos patrones globales macroscópicos se traduce a la auto-organización del sistema.

En un sistema complejo, el orden puede emerger sin un diseño o sin la intervención de un diseñador. Wilensky y Rand (2015) identifican dos formas principales de estudiar y comprender el fenómeno de comportamiento emergente colectivo.

- *Comprensión Integrativa*
- *Comprensión Diferencial*

Cada una representa una dificultad distinta. La comprensión integrativa consiste en anticipar o conocer los patrones de agregación conociendo el comportamiento individual de los elementos en el sistema. La comprensión diferencial surge cuando se conocen los patrones de agregación e intentas averiguar el comportamiento de los elementos que generan estos patrones. Esto es, el proceso inverso al integrativo.

### 2.2.2. Ciclo de modelado

Un modelo es una descripción abstracta de un proceso, objeto o evento que exagera ciertos aspectos a expensas de otros y que intenta describir o predecir un fenómeno. Un modelo se construye con el propósito de resolver problemas y contestar preguntas acerca de un sistema o conjuntos de sistemas. Para construir un modelo se debe llevar a cabo un proceso de diseño iterativo y bien definido. A este proceso se le conoce como ciclo de modelado.

Railsback y Grimm (2019) plantean una serie de pasos en el ciclo de modelado que consisten de lo siguiente:

#### 1. Formular la pregunta o las preguntas.

Previo al diseño y construcción de un modelo, se debe tener una pregunta clara y bien definida de investigación. Esta sirve como guía en el diseño del modelo ya que una pregunta clara requiere de un enfoque claro del problema. En ocasiones estas preguntas pueden ser un poco experimentales, es decir, no ser lo suficientemente específicas, ser demasiado simples o muy complejas. Posteriormente es necesario reformular y refinar las preguntas de investigación.

#### 2. Establecer las hipótesis para procesos y estructuras.

Es necesario trabajar sobre un modelo simple y minimalista e ir construyendo a través de casos hipotéticos del problema. Esto se hace con el objeto de no sobrecargar el modelo siguiendo un diseño de arriba hacia abajo.

#### 3. Elegir una escala, entidades, variables de estado, procesos y parámetros.

Una vez que se tienen las suposiciones y las hipótesis simplificadas para representar el

sistema, es necesario especificar ahora los detalles del modelo. En esta etapa se produce una formulación escrita del modelo para tener una comprensión de como funciona y como se relacionan los elementos del modelo.

#### 4. Implementar el modelo.

Esta es la etapa técnica del modelo donde se utilizan herramientas matemáticas y programas de computadora para traducir nuestra descripción verbal del modelo a una animación o simulación.

#### 5. Analizar, probar y revisar el modelo.

La etapa de análisis y pruebas consiste de la observación de la simulación, el ajuste de parámetros y variaciones del modelo para observar resultados bajo condiciones diversas. Es una etapa laboriosa y una parte importante del modelo.

#### 6. Comunicar el modelo.

La etapa de comunicación consiste en comunicar los resultados al público de interés, ya sea científico, un cliente o el público en general. En esta etapa se desarrolla un documento o reporte de investigación con los hallazgos encontrados.

Este proceso iterativo de formulación, implementación y evaluación no es un proceso fijo. Es un proceso dinámico que provee de una estructura útil de diseño. En la figura 2.3 se observa cómo es el proceso cíclico que completa el diseño de un modelo.

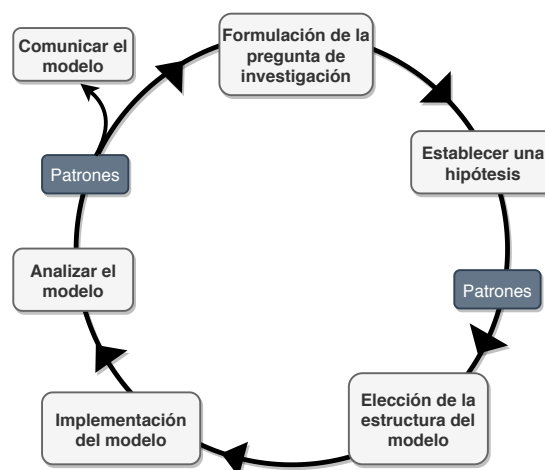


Figura 2.3: El ciclo de modelado y diseño. Recuperado de Railsback y Grimm (2019).

### 2.2.3. Componentes de un modelo basado en agentes

Desde un punto de vista de alto nivel, los componentes principales de un ABM son: los **agentes**, el **ambiente** y las **interacciones** (agente-agente y agente-ambiente). Los agentes se pueden ver como las unidades ontológicas del modelo, mientras que un ambiente es el espacio de acciones de los agentes.

Cabe mencionar que las acciones también se dan en el interior del agente; cuando tiene que tomar decisiones o percibir, etc. El ambiente no necesariamente es pasivo, si no que podría ser dinámico y cambiar de manera autónoma (para nuestro modelo, este no es el caso).

Adicional a estos tres componentes principales, podemos identificar otros dos componentes secundarios. Uno es el **observador/interfaz de usuario**, que también es un agente y tiene acceso a todos los demás agentes y al ambiente. Este agente da instrucciones a los demás agentes mientras que el usuario interactúa a través de la interfaz de usuario la cuál permite decirle al observador que es lo que debe hacer el modelo.

El segundo componente es el **calendario de actividad**. Este es lo que usa el observador para decirle a los agentes cuando deben actuar. El calendario en ocasiones involucra la interacción del usuario. Por ejemplo, en los modelos de NetLogo la interfaz de usuario usualmente hace uso de dos botones principales: El botón **setup** y el botón **go**. El usuario presiona **setup** y después **go** para calendarizar la ocurrencia de estos eventos.

#### Agentes

Los agentes son las unidades básicas de un **ABM**. Por lo tanto es importante elegir el diseño del agente de manera cuidadosa. Los dos aspectos principales que distinguen a los agentes son las *propiedades* que tienen y las *acciones* que puede ejecutar.

Las propiedades son los estados internos y externos del agente –su descripción y sus datos. Estas propiedades describen el estado actual del agente: la velocidad actual, su dirección, su alineación, su posición, etc. Dependiendo del diseño del agente y de lo que se quiere lograr con el modelo.

Las acciones son las maneras en las que el agente puede cambiar o modificar el estado del ambiente, de otros agentes o de si mismo. Algunas de ellas son; avanzar, retroceder, moverse

hacia la izquierda o la derecha, detenerse, etc.

### **Ambiente**

El diseño del ambiente es otro componente con implicaciones importantes en el modelo de simulación. El ambiente consiste de las condiciones y hábitats que rodean a los agentes, ya que actúan dentro del modelo. El ambiente puede afectar a las decisiones del agente y a su vez, este puede verse afectado por las decisiones del agente formando un ciclo de interacción.

Un aspecto importante a destacar en el ambiente es el tipo de *topología* que se está ocupando para describir el ambiente. Esta topología nos indica como tratar con las condiciones de frontera para el ambiente en cuestión. Es decir, cuando un agente llega al límite del ambiente. ¿Qué sucede? Se tienen tres tipos de topología. (1) la topología toroidal, donde un agente reaparece en el otro extremo del ambiente; (2) la topología limitada, donde el agente permanece en el límite del ambiente; o (3) la topología del plano infinito, donde el agente se dirige hacia la misma dirección de manera infinita.

Por último, el ambiente puede definirse en dos dimensiones, o puede ser un ambiente tridimensional, dependiendo de la necesidad del modelo en cuestión. También es posible trabajar sobre un escenario de sistemas de información geográfica (GIS por sus siglas en Inglés). Para este caso se ocupa gran cantidad de información recolectada del ambiente.

### **Interacciones**

Existen cinco clases de interacciones básicas en un **ABM**: interacciones en el *propio agente*, interacciones en el *propio ambiente*, interacciones *agente-agente*, *ambiente-ambiente* y por último, *agente-ambiente*.

**Interacciones en el propio agente** Las interacciones pueden ocurrir en el agente mismo.

El agente considera su estado actual y decide que hacer acto seguido.

**Interacciones en el propio ambiente** Estas suceden cuando algunas áreas en el ambiente se alteran o cambian por si mismas.

**Agente-agente** Las interacciones entre agentes usualmente son las mas importantes en un **ABM**. Se pueden dar de muchas formas; por ejemplo, los agentes podrían colaborar o competir.

**Ambiente-ambiente** En este caso, un ambiente podría ser parte de otro e interactuar. Por lo regular estas interacciones no son muy usuales.

**Agente-ambiente** Estas ocurren cuando el o los agentes manipulan el ambiente directamente o examinan partes distintas del mundo donde se encuentran.

### Observador/interfaz de usuario

El observador es un agente que controla la ejecución del modelo. Es un agente de alto nivel responsable de asegurar que el modelo se ejecute y proceda de acuerdo a los pasos desarrollados por el diseñador. El observador da ordenes a los agentes, diciéndoles que manipulen sus datos o que lleven a cabo ciertas acciones. Por ejemplo, el procedimiento **setup** es un agente de tipo observador, así como el procedimiento **go**, entre otros.

Un **ABM** requiere de una interfaz de control o de un grupo de parámetros que permitan al usuario establecer distintas condiciones o parámetros para el modelo. El mecanismo de control mas común es el *botón*, el cual ejecuta uno o mas comandos en el modelo. Si es un *botón infinito* continuará ejecutando los comandos que contiene hasta que el usuario lo presione nuevamente. Otra manera de ejecutar comandos es a través de la *línea de comandos* en la interfaz.

Existen otros controles de entrada y salida para la interfaz. Los de entrada tienen un todo azul: deslizadores, interruptores, selectores y cajas de entrada. Mientras que los controles de salida tienen una coloración caqui: monitores, gráficas, área de salida y notas.

### Calendario de actividad

El calendario es una descripción del orden en el cuál opera el modelo. Es el orden de los eventos que ocurren dentro del modelo, el cuál depende de la secuencia de botones que presiona el usuario y los procedimientos o códigos que ejecutan estos botones.

## 2.3. Dinámica de peatones

La dinámica de peatones es el estudio del comportamiento de peatones y multitudes humanas en movimiento y las propiedades dinámicas que presentan. La actividad y formación

de patrones a gran escala es predecible para densidades muy altas. Sin embargo, para densidades bajas los peatones se mueven libremente, y no se ven afectados por las interacciones repulsivas de otros peatones vecinos.

A consecuencia de este estudio, se han propuesto diversos modelos desde 1970 y posteriormente (Ballinas-Hernández y cols., 2011; Dijkstra y cols., 2001; Henderson, 1974; Helbing y Molnar, 1998; Ronald y cols., 2007; Schadschneider y cols., 2001). Estos modelos son basados en dinámica de fluidos, modelos basados en fuerzas físicas, autómatas celulares y modelos basados en agentes, entre otros.

Respecto a la parte experimental de la dinámica de peatones, se han observado una serie de comportamientos de caminata a nivel individual y a nivel colectivo. Helbing y cols. (2001) establece que:

- (1) Un peatón difícilmente regresa en dirección contraria a su dirección de caminata deseada, incluso si el camino en adelante está sobre-poblado de más peatones. Un peatón normalmente elige la ruta más rápida que le lleve a su destino. Si hay alguna ruta alternativa igual en distancia, este elige la que es más directa.
- (2) Los peatones tienen una velocidad de caminata confortante (el menor gasto de energía posible), siempre y cuando no sea necesaria apresurarse para llegar a su destino a tiempo. Las velocidades deseadas en las multitudes de peatones están distribuidas de manera Gaussiana con un valor medio de aproximadamente  $1,34m/s$  y una desviación estándar de  $0,26m/s$ .
- (3) El peatón mantienen una cierta distancia de separación con respecto a otro peatón, a la pared, a una calle o a un obstáculo. Esta distancia se vuelve corta conforme el peatón se apresura o cuando aumenta la densidad de peatones.
- (4) Los peatones normalmente no reflejan sus estrategias de comportamiento (esconden sus intenciones), actúan de manera mas o menos automática.

Estas observaciones proveen de un componente de realismo a los modelos de simulación. Algunos de los modelos solo toman ciertas particularidades de peatones reales, suficientes para alcanzar un modelo de simulación que reproduzca el comportamiento de peatones en ambientes o pasillos artificiales.

## 2.4. Modelo del peatón

En este apartado de la tesis se describe el modelo basado en agentes que se implementó en el sistema multiagente, basado fundamentalmente en el trabajo de Ballinas-Hernández y cols. (2011). Los peatones se caracterizan por las siguientes variables cinemáticas: *ubicación*, *velocidad de caminata* y *orientación*. Además de un *campo perceptual local* que permite evaluar las condiciones de su entorno y una dirección de referencia para un punto de destino. Todas estas variables son actualizadas iterativamente durante la simulación, de acuerdo a las condiciones locales de los peatones.

Se tienen dos definiciones que constituyen el modelo. Una definición microscópica que corresponde a la composiciones y descripción formal de un peatón, y una definición macroscópica correspondiente al conglomerado de peatones.

Microscópicamente el estado del peatón se define como una tupla:

$$P_\alpha(t) = (\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{z}; t)_\alpha \quad \alpha = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (2.1)$$

donde:

$N$  es el número total de peatones en el pasillo.

$\mathbf{x}_\alpha = (x, y, \theta)_\alpha$  es la ubicación y la orientación del peatón en el pasillo.

$\mathbf{v}_\alpha = (v, \omega)_\alpha$  es la velocidad de caminata del peatón.  $v_\alpha$  es el tamaño del paso (**step size**) y  $\omega_\alpha$  el tamaño del giro (**turn size**).

$\mathbf{z}_\alpha = \langle Zp, \mathbf{h}, \mathbf{g} \rangle_\alpha$  es el vector de información perceptual, donde  $Zp_\alpha$  es el campo perceptual,  $\mathbf{h}_\alpha$  es el ladeo (**heading**) del peatón y  $\mathbf{g}_\alpha$  es el punto de destino (**goal**).

$t$  es el tiempo (**ticks**).

El conglomerado o sistema multiagente se representa de manera macroscópica como una supertupla o tupla de tuplas:

$$C(t) = (\{P_\alpha | \alpha = 1, 2, 3, \dots, N\}, \zeta, \phi, \psi; t) \quad (2.2)$$

donde:

$P_\alpha$  es el conjunto de todos los peatones.

$\zeta$  es el componente de percepción del peatón.

$\phi$  es el módulo de toma de decisiones de un conjunto de reglas de caminata.

$\psi$  es el módulo de actuación. Este actualiza las variables de estado de cada agente.

$t$  es el tiempo o ticks de la simulación.

El peatón es un agente de software que resuelve un problema en particular, esto es, llegar al extremo opuesto del pasillo. El sistema multiagente consiste del conjunto de estos agentes de software que trabajan conjuntamente para resolver este problema complejo.

## 2.5. Diagrama fundamental de flujo

El diagrama fundamental de flujo nos provee de un método para medir el rendimiento del sistema multiagente. El diagrama es la cuantificación del flujo del sistema a través del tiempo y que depende de la densidad de la multitud. Además de la importancia que tiene en el dimensionamiento de espacios peatonales, el diagrama fundamental está relacionado con los fenómenos cualitativos de auto-organización (e.g., formación de veredas, franjas en diagonal, formación de atascos).

El flujo  $J$  de una corriente peatonal es el número de peatones que atraviesan una ubicación fija en el ambiente por unidad de tiempo  $t$ . Existen diferentes métodos para medir el flujo  $J$ . Para una ubicación fija en el espacio, debemos determinar la diferencia  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ , para dos peatones consecutivos  $i$  e  $i + 1$ . Esta diferencia está relacionada al flujo (véase Schadschneider y Seyfried, 2008).

$$J = \frac{1}{\langle \Delta t \rangle} \quad \text{para,} \quad \langle \Delta t \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_{i+1} - t_i) = \frac{t_{N+1} - t_1}{N} \quad (2.3)$$

Otra forma de medir el flujo de una corriente peatonal es a través de una ecuación de la dinámica de fluidos.

El flujo a través de un ambiente de ancho  $b$  determinado por la densidad promedio  $\rho$  y la rapidez promedio  $v$  de una corriente peatonal es

$$J = \rho vb \tag{2.4}$$

Da el flujo por unidad de ancho del pasillo. Esta relación se conoce como *relación hidrodinámica*. Y la densidad se calcula como el número de peatones  $N$  dentro de un área seleccionada  $A$ .

$$\rho = \frac{N}{A} \tag{2.5}$$

Para nuestro caso  $A = 1$ , dado que por cada peatón se tiene una celda de ocupación, y  $\rho = N$ .

## 2.6. Entornos de simulación multiagente

La implementación de un **ABM** puede realizarse desde cero, haciendo uso de cualquier lenguaje de programación procedural o imperativo como C++, Java, Python, etc. Sin embargo, existe una variedad de lenguajes y herramientas con enfoque en agentes como Swarm<sup>®</sup> el cual es el ancestro de las herramientas de diseño de **ABMs** desarrollado en 1990s en el instituto de Santa Fe. Otra herramienta de simulación y modelado multiagente es REPAST con componentes para algoritmos genéticos y redes neuronales. También se tienen otros modeladores importantes como ASCAPE<sup>®</sup>, MASON<sup>®</sup>, Mass<sup>®</sup>, Breve<sup>®</sup>, donde algunos comparten componentes en común y otros son mas rápidos ya que trabajan a un medio nivel o bajo nivel. En este caso se eligió NetLogo<sup>®</sup> por su facilidad de uso, su sintaxis limpia, sus componentes y principalmente porque ya se tenía una base sobre la cual trabajar.

# Capítulo 3

## Metodología

El desarrollo del entorno de simulación se llevó a cabo de manera conjunta con el diseño del sistema multiagente y los ambientes complejos. Se recopiló información empírica de la literatura del comportamiento peatonal con el objeto de probar nuestro modelo con información real. Para el desarrollo del simulador y el **MAS** se ocupó NetLogo<sup>®</sup>, un entorno de modelado programable multiagente para simular fenómenos sociales o naturales (Wilensky, 1999). Netlogo<sup>®</sup> es útil para modelar sistemas complejos que se desarrollan con el tiempo y provee al diseñador de las herramientas necesarias para trabajar con agentes de software.

Los peatones en este modelo son agentes situados que se encuentran embebidos al ambiente. Estos perciben información local a partir de un campo perceptual discreto que tienen integrado de forma inherente. Este modelo se construye sobre la base de un modelo previamente formulado por Ballinas-Hernández y cols. (2011) donde proponen un enfoque de peatones heterogéneo (peatones apresurados, pasivos y con velocidad estándar) el cual está constituido por un conjunto de reglas bien definidas que aplican los peatones a nivel local, un módulo lógico de *percepción*, un módulo de *toma de decisiones*, y por último un módulo de *actuación* para resolver encuentros previamente identificados por los diseñadores. Este sistema es una formulación abstracta que se limita únicamente a simular y resolver el flujo para un pasillo bidireccional.

En el nuevo modelo, las reglas se extienden hacia nuevos pasillos bidireccionales y se consideran otros casos que dificultan el flujo peatonal, como obstáculos, salidas laterales, fragmentación del pasillo en dos, o intersecciones peatonales complejas.

En el diagrama de la figura 3.1 se muestra el flujo de trabajo durante el proceso de simulación. El flujo sigue una serie de etapas importantes; A) El usuario selecciona el mundo o ambiente para simular. B) Se establece la configuración inicial como el número de peatones, las iteraciones, el número máximo de peatones permitidos, etc. C) La simulación inicia, generando gráficas de rendimiento del sistema e imágenes panorámicas de los peatones virtuales. Los *ticks* representan las marcas de tiempo para una ejecución de la simulación.

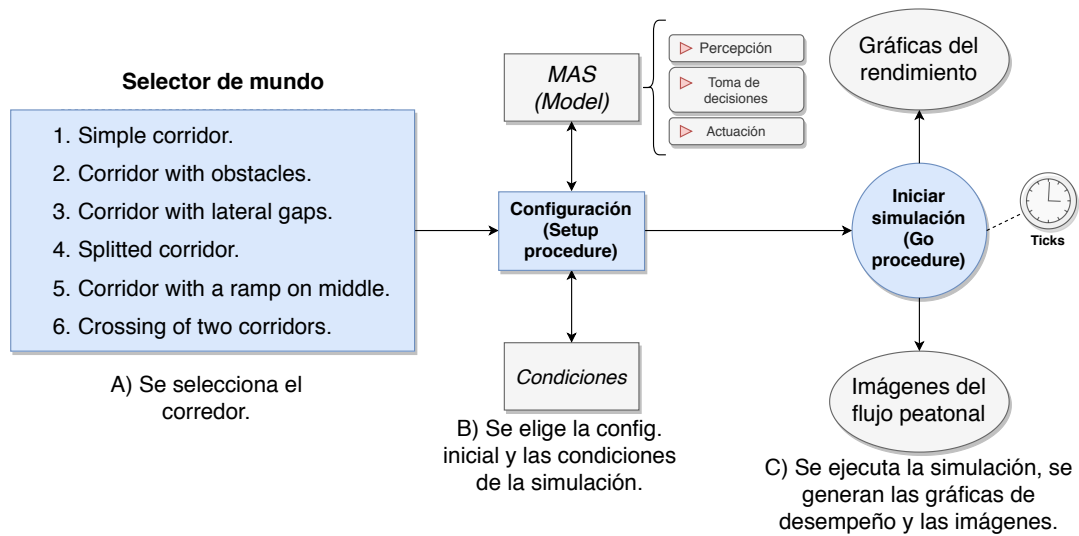


Figura 3.1: Diagrama que muestra el flujo de trabajo del simulador.

Este diagrama representa el proceso de simulación del **MAS** en alto nivel, donde cada bloque constituye un subsistema de la implementación del programa de simulación.

**Selector de mundo** Previo al inicio de la simulación se debe seleccionar el tipo de pasillo bidireccional. Esto se realiza manualmente por el diseñador.

**Configuración (setup procedure)** Asigna el pasillo con su configuración, reinicia las marcas de tiempo (*ticks*), inicializa las variables locales, como el incremento de peatones por cada iteración, etc.

**MAS** El sistema multiagente que consiste de los módulos de percepción, toma de decisiones y acción.

**Condiciones** Las condiciones se eligen en la interfaz de simulación. Las condiciones iniciales son el ancho del pasillo, el número de peatones que inician (sin exceder el área del pasillo), el número de iteraciones, la distribución de los peatones, el desfase del pasillo fragmentado, etc.

**Iniciar (go procedure)** La simulación inicia en cero ticks, termina hasta alcanzar el número de iteraciones que se especificaron previamente y vuelve a iniciar otro ciclo de simulación para generar las gráficas de flujo promedio y las instantáneas de los pasillos.

**Gráficas de rendimiento** Se generan gráficas del rendimiento del sistema, como velocidad promedio del colectivo y actividad promedio.

**Imágenes** Las imágenes instantáneas muestran el conglomerado de peatones desde una vista panorámica y la formación de patrones.

En la siguiente figura 3.2 se muestra una impresión de pantalla del simulador con todos los componentes de interfaz. En el lado izquierdo se elige el tipo de pasillo bidireccional, se especifica el ancho del pasillo y posteriormente se presiona el botón *setup* para inicializar la configuración. El pasillo se mostrará en la pantalla en negro.

Posteriormente se agregan los peatones con los deslizadores. El máximo número de peatones que se puede agregar depende del área del pasillo actual. Los peatones pueden distribuirse linealmente o por cúmulos. El botón *go* inicia la simulación y las gráficas muestran la velocidad y la actividad promedio en función de la densidad. La actividad promedio se refiere al uso promedio de las reglas para resolver encuentros.

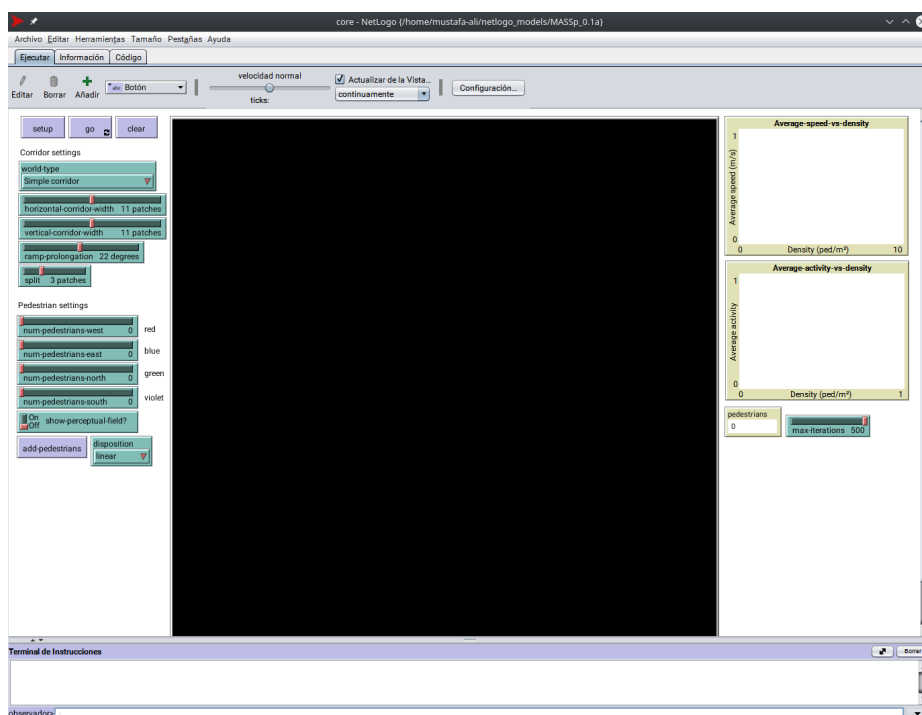


Figura 3.2: Interfaz del simulador con todos sus componentes.

### 3.1. Propuesta de investigación

En este trabajo se propone un sistema multiagente (**MAS**, por sus siglas en inglés) capaz de caracterizar o reproducir el comportamiento de conglomerados de peatones para distintos ambientes complejos bidireccionales. La caracterización de los conglomerados se evalúa a través de las gráficas de rendimiento, estas gráficas nos permiten comprender relaciones entre densidad y tiempo, o relaciones entre la densidad y la geometría del ambiente. Conocer en que punto en el tiempo el sistema se auto-organiza (ocurre un cambio de fase). Que intercambios se dan entre la densidad (ocupación por metro cuadrado) y la velocidad promedio de la multitud. El sistema no ocupa de manera intencional un componente de *atracción-repulsión* dado que el peatón en nuestro caso no es visto como una partícula, si no como un agente autónomo. Este agente se limita únicamente a percibir, decidir de manera adecuada, y a actuar. Posteriormente actualiza su información de entrada, y nuevamente aplica el mismo proceso.

### 3.2. Diseño de entornos bidireccionales

Todos los ambientes propuestos son pasillos bidireccionales o en contraflujo. Cada uno con características propias y otras variables globales que tienen en común, como la variación en el ancho del corredor (medido en celdas cada una de 10 píxeles). Por omisión, el mundo en NetLogo<sup>®</sup> tiene una topología toroidal (i.e., no tiene límites), esto significa que es envolvente y que cada celda (patch), tiene el mismo número de vecinos. Por lo tanto cuando un agente se mueve hacia un extremo del eje  $x$  desaparece y reaparece en la dirección opuesta  $-x$ . Lo mismo sucede para el eje vertical  $y$ .

Previo al diseño de los espacios bidireccionales se debe elegir la configuración del mundo en NetLogo<sup>®</sup> como lo es: la ubicación del origen, el tamaño del mundo, el tamaño de una parcela o celda, etc. En la figura 3.3 se muestra la configuración para nuestro entorno de simulación. La ubicación del origen es centrada, mientras que el tamaño de la pantalla de dibujo es de  $81 \times 81$  considerando el 0 como el origen. El tamaño de las parcelas es de 10 píxeles y los cuadros por segundo son de 30 en velocidad normal de la simulación.

Los parámetros `max-pxcor` y `max-pycor` representan el largo y el ancho del mundo. En la imagen de la figura 3.4 se muestra el mundo cuadriculado de NetLogo<sup>®</sup>. A estas cuadrículas



Figura 3.3: El mundo de NetLogo<sup>®</sup> está hecho de celdas o parcelas.

se les llama *parcelas*.

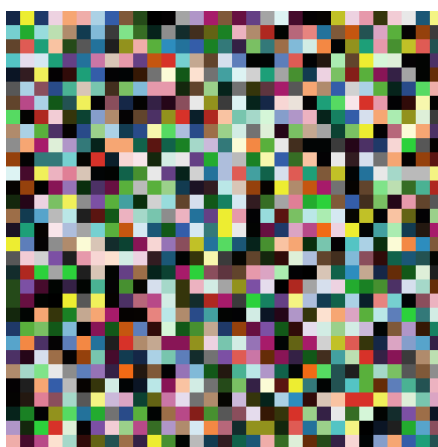


Figura 3.4: Mundo cuadrulado de NetLogo<sup>®</sup>.

### 3.2.1. Pasillo simple bidireccional

Para el diseño de los pasillos se realiza una serie de procedimientos iterativos sobre el número de parcelas en el mundo y para cada punto coordenado  $x$  e  $y$ .

En el Algoritmo 1 se dibuja el pasillo simple bidireccional en donde  $x$  aumenta de forma lineal y  $y$  es constante.  $y$  es una variable global introducida por el observador. En la operación 5 se pinta el ambiente de color gris para no trabajar sobre un plano en negro (por cuestiones

de estética). En el ciclo 7 a 11 se realiza un proceso iterativo sobre el eje  $x$  hasta terminar en el punto de origen. Cada parcela representativa de una pared, se dibuja de color negro.

---

**Algorithm 1** Algoritmo de dibujo: Pasillo simple

---

```

1: procedure DRAW-CORRIDOR(width)           ▷ Donde width es el ancho del pasillo y
2:    $x \leftarrow 0$                                ▷  $2 \leq width \leq 20$ 
3:    $y \leftarrow (width + 1)/2$ 
4:   for all patches do
5:      $pcolor \leftarrow grey$                    ▷ pcolor es el atributo de color de la parcela
6:   end for
7:   for  $x$  to 81 do
8:      $patch(x, y) \leftarrow color = black$        ▷ patch es la coordenada de la parcela
9:      $patch(x, (y * -1)) \leftarrow color = black$ 
10:     $x = x + 1$ 
11:  end for
12: end procedure

```

---

El área del pasillo es el espacio permisible para la distribución de peatones. Esta se calcula previo al introducir los peatones y se toma como una restricción. Si el número de peatones es mayor al área de caminata entonces, ocurre una excepción. El área se calcula multiplicando el ancho por el largo del pasillo.

En la figura 3.5 se muestra el pasillo dibujado en el ambiente de NetLogo®.

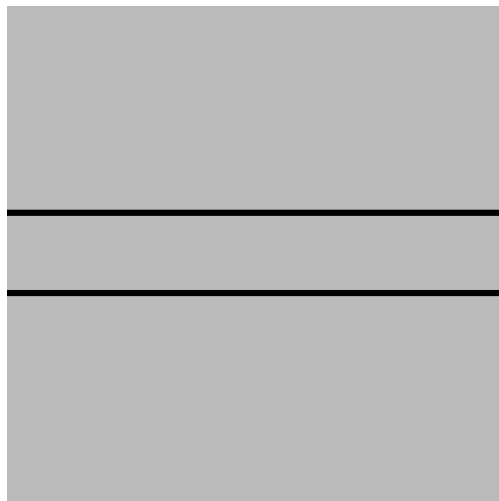


Figura 3.5: Estructura del pasillo simple bidireccional.

### 3.2.2. Pasillo con salidas laterales

Para el pasillo con salidas laterales se sigue el mismo principio de construcción iterativo, solo que con una condición que se debe cumplir para crear las salidas laterales. En el algoritmo 2 se muestra como se diseña este pasillo. En la comparación en la línea 10 se evalúa si  $x$  está en un intervalo cerrado de  $\{17, 22\}$  o de  $\{-17, -22\}$  entonces esas parcelas se pintan de color gris para permitir las salidas o aperturas laterales para ambas paredes.

---

**Algorithm 2** Algoritmo de dibujo: Pasillo con salidas laterales

---

```

1: procedure DRAW-CORRIDOR( $width$ )           ▷ Donde  $width$  es el ancho del pasillo y
2:    $x \leftarrow 0$                                ▷  $2 \leq width \leq 20$ 
3:    $y \leftarrow (width + 1)/2$ 
4:   for all patches do
5:      $pcolor \leftarrow grey$                    ▷  $pcolor$  es el atributo de color de la parcela
6:   end for
7:   for  $x$  to 81 do
8:      $patch(x, y) \leftarrow color = black$        ▷  $patch$  es la coordenada de la parcela
9:      $patch(x, (y * -1)) \leftarrow color = black$ 
10:    if  $(17 \leq x \leq 22)$  or  $(-17 \leq x \leq -22)$  then
11:       $patch(x, y) \leftarrow color = grey$ 
12:       $patch(x, (y * -1)) \leftarrow color = grey$ 
13:    end if
14:     $x = x + 1$ 
15:  end for
16: end procedure

```

---

El pasillo con salidas laterales se muestra en la figura 3.6, se observan cuatro aperturas en la pared superior e inferior, las cuales son de seis parcelas de ancho cada una. Estas van a permitir la entrada y salida de peatones durante la simulación.

### 3.2.3. Pasillo fragmentado

Para dibujar el pasillo fragmentado en dos, se debe iterar sobre distintos conjuntos de parcelas hasta alcanzar la mitad del plano cartesiano. El algoritmo 3 muestra este proceso iterativo donde la construcción de las paredes se divide en cuatro partes. La pared superior

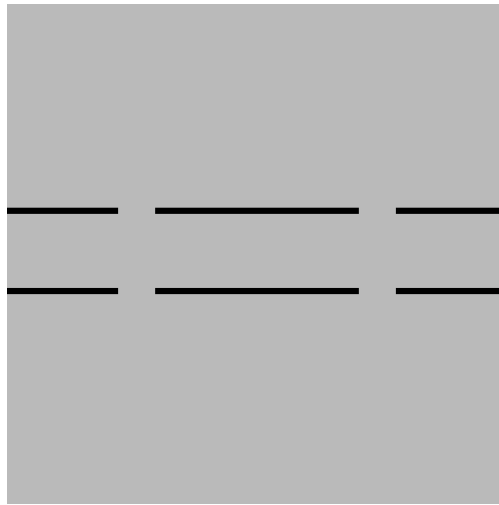


Figura 3.6: Estructura del pasillo bidireccional con salidas laterales.

e inferior derecha, y la pared superior e inferior izquierda. La mitad izquierda del pasillo puede desplazarse sobre un conjunto de parcelas  $i \in 0, \dots, 10$ .

En el ciclo de 7 a 13 se construyen las cuatro paredes, junto con una variable global  $i$  que consiste del desplazamiento de la mitad izquierda del pasillo. Los puntos en el plano  $(x, y)$  representan el eje  $x$  positivo a partir de  $x = 0$  hasta  $x = 40$ . El punto  $(x, (y * -1))$  representa al inverso de  $y$ , que consiste de la pared inferior derecha. En los demás puntos se itera sobre el inverso de  $x$ , junto con un incremento en  $y$  para desplazar la mitad del pasillo  $i$  veces.

La imagen de la figura 3.7 muestra el pasillo fragmentado en dos, con una amplitud de 12 parcelas y un deslizamiento de  $i = 6$ .

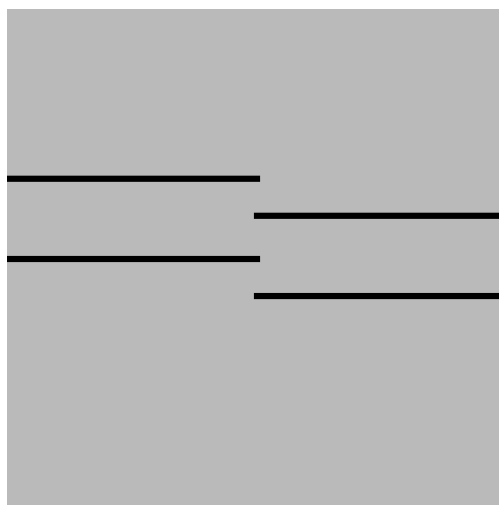


Figura 3.7: Estructura del pasillo bidireccional fragmentado en dos partes.

---

**Algorithm 3** Algoritmo de dibujo: Pasillo fragmentado en dos
 

---

```

1: procedure DRAW-CORRIDOR( $width, i$ )           ▷ Donde  $width$  es el ancho del pasillo y
2:    $x \leftarrow 0$                                ▷  $width \in \{2, 3, \dots, 20\}$ 
3:    $y \leftarrow (width + 1)/2$                    ▷  $i$  es el desplazamiento del pasillo,  $i \in \{0, \dots, 10\}$ 
4:   for all patches do
5:      $pcolor \leftarrow grey$ 
6:   end for
7:   for  $x$  to 41 do
8:      $patch(x, y) \leftarrow color = black$        ▷ Pared superior derecha
9:      $patch(x, (y * -1)) \leftarrow color = black$  ▷ Pared inferior derecha
10:     $patch((x * -1), (y + i)) \leftarrow color = black$  ▷ Pared superior izquierda
11:     $patch((x * -1), ((y * -1) + i)) \leftarrow color = black$  ▷ Pared inferior izquierda
12:     $x = x + 1$ 
13:  end for
14: end procedure

```

---

### 3.3. Diseño del sistema multiagente

Un peatón es un individuo tipo agente y autónomo, con la capacidad de percibir, tomar decisiones y actuar. De esta manera modificando su ambiente.

Se diseñaron tres módulos principales que forman el núcleo de funcionamiento del agente peatón. Estos tres módulos –la percepción, toma de decisiones y acción– se relacionan entre sí, y se integran en un procedimiento lógico de caminata del peatón.

#### 3.3.1. Percepción

El módulo de percepción es el encargado de que el agente pueda adquirir información sobre sí mismo y sobre el ambiente. El agente percibe información interna y externa. La información interna es el **heading** que representa la orientación con respecto a la pared, la variable **goal** que es hacia donde se dirige, como también el **step size** que es la velocidad que lleva. Esto lo hace a través de un mecanismo propioceptivo que se implementa como parte de la percepción.

La información externa que percibe son las condiciones del área que le rodea al peatón, el cuál se adquiere por medio del campo perceptual. Este campo consiste de tres cuadrados frontales y dos laterales (la imagen de la figura 3.8 muestra el campo perceptual), y se encuentra unido a cada agente. El campo es simétrico con respecto al vector que representa la orientación de caminata o el *heading* del agente.

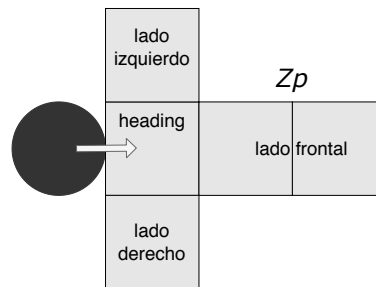


Figura 3.8: Campo perceptual del peatón.

Cada agente peatón examina constantemente el estado de su campo perceptual, comenzando por el cuadro frontal mas cercano y terminando en los cuadros laterales. Las situaciones que un agente peatón es capaz de percibir desde su área de percepción ocupada son, la caminata libre (**CL**, figura 3.9a), caminata con obstáculo (**CO**, figura 3.9b), encuentro con peatón (**EP**, figura 3.9c) y encuentro combinado (**EC**, figura 3.9d) de peatón y obstáculo. En cada una de las situaciones previas un agente puede estar *alineado* o *desalineado* con respecto a los bordes o paredes del pasillo. La figura 3.9 muestra las distintas configuraciones de percepción de un agente.

El peatón tiene un límite perceptual que lo dota de realismo. Esto significa que solo puede percibir información externa cuando se encuentra con un compañero, como dirección de flujo, su posición dentro de su propio campo perceptual o su orientación de caminata. Por otra parte, no es capaz de percibir la velocidad de otro peatón, hacia donde se dirige, etc. El peatón no tiene un alcance completamente transparente cuando percibe. Esto provee de un mecanismo de percepción suficientemente realista.

### 3.3.2. Toma de decisiones

Una vez que el agente conoce su estado a partir de la información adquirida a través de su módulo perceptual, lleva a cabo una decisión acerca de su siguiente movimiento que lo acercará o llevará a su destino final.

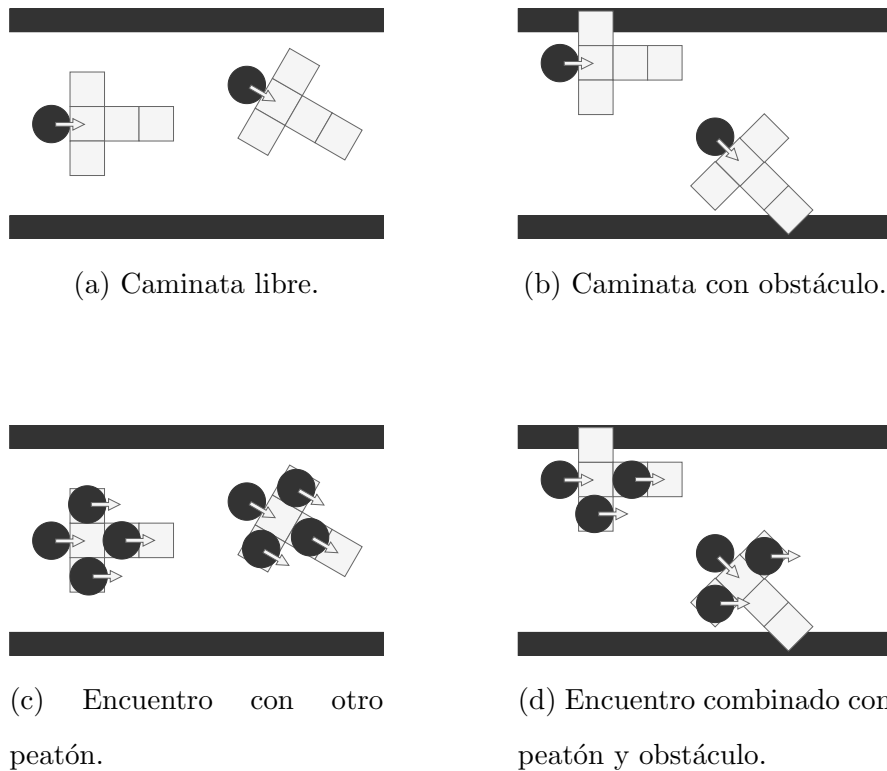


Figura 3.9: Situaciones de percepción por un peatón a través de su campo perceptual.

A pesar del límite de percepción del agente en un área local, se pueden presentar una variedad de casos que resultan de la ocupación de las celdas de su campo perceptual. Estos casos involucran conflictos de tráfico y se resuelven a través del uso de un conjunto de reglas de evasión para colisiones. Estas colisiones son importantes porque pueden impedir que el agente llegue a su destino y alcance su objetivo de atravesar el pasillo.

El módulo de toma de decisiones consiste de un conjunto de reglas de caminata, las cuales son comunes para todos los agentes. Las reglas de caminata son reglas genéricas que sintetizan una variedad de situaciones que fueron identificadas previamente. Estas reglas permiten a los peatones la resolución de encuentros con otros peatones o encuentros combinados con peatones y pared.

Algunas de las reglas tienen asociadas una preferencia de giro, cuando el peatón va en caminata libre, encuentra un obstáculo, un peatón o un encuentro mixto. Estas preferencias se dan previamente como números enteros. Estas son las siguientes:

- Cuando el peatón tiene el camino libre, tiene una preferencia de giro del 6%
- Cuando el peatón encuentra pared, tiene una preferencia de giro del 50%

- Cuando el peatón encuentra otro peatón, tiene una preferencia de giro del 70 %
- Cuando el peatón encuentra pared y otro peatón, tiene una preferencia de giro del 70 %

Cabe destacar que las preferencias de giro se utilizan para establecer un rango de probabilidad para la toma de decisiones. Es decir, en cada una de las reglas si el peatón tiene la posibilidad de avanzar o girar, este lanza una moneda.

### Reglas de evasión

- 1 Si el peatón se encuentra alineado con respecto a las paredes del pasillo y percibe caminata libre de peatones y obstáculos, este realiza giros de confort aleatorios y avanza (figura 3.10a). Esto lo lleva a perder su alineación de manera momentánea.
- 2 Si el peatón percibe pared, este realiza un giro para evitar la pared y avanza (figura 3.10b).
- 3 Si el peatón se encuentra alineado en el pasillo y percibe a otro peatón frontal en dirección al flujo, entonces puede avanzar primero, o girar hacia la izquierda o hacia la derecha y avanzar (figura 3.10c).
- 4 Si el peatón se encuentra alineado y percibe a otro peatón frontal en contra-flujo, entonces gira hacia la izquierda o la derecha y avanza posteriormente (figura 3.10d).
- 5 Si el peatón se encuentra alineado y percibe a otro peatón frontal (no alineado) en flujo o en contra-flujo, entonces para el caso del peatón en flujo puede girar hacia la misma dirección (figura 3.10e) o hacia la orientación negativa de su compañero (figura 3.10f) gira hacia la izquierda o la derecha.

Las primeras cuatro reglas resuelven situaciones que pueden darse en el pasillo. Las dos reglas del punto 5 son variantes de las reglas 3 y 4, además de éstas pueden darse los siguiente casos.

- 6 Si el peatón se encuentra alineado con el pasillo y percibe un compañero frontal y lateral, entonces realiza un giro de evasión (figura 3.11a).
- 7 Si el peatón está alineado al pasillo y percibe dos compañeros laterales y a uno frontal en flujo, entonces no gira, pero puede avanzar, si el espacio de adelante esta vacío (figura 3.11b).

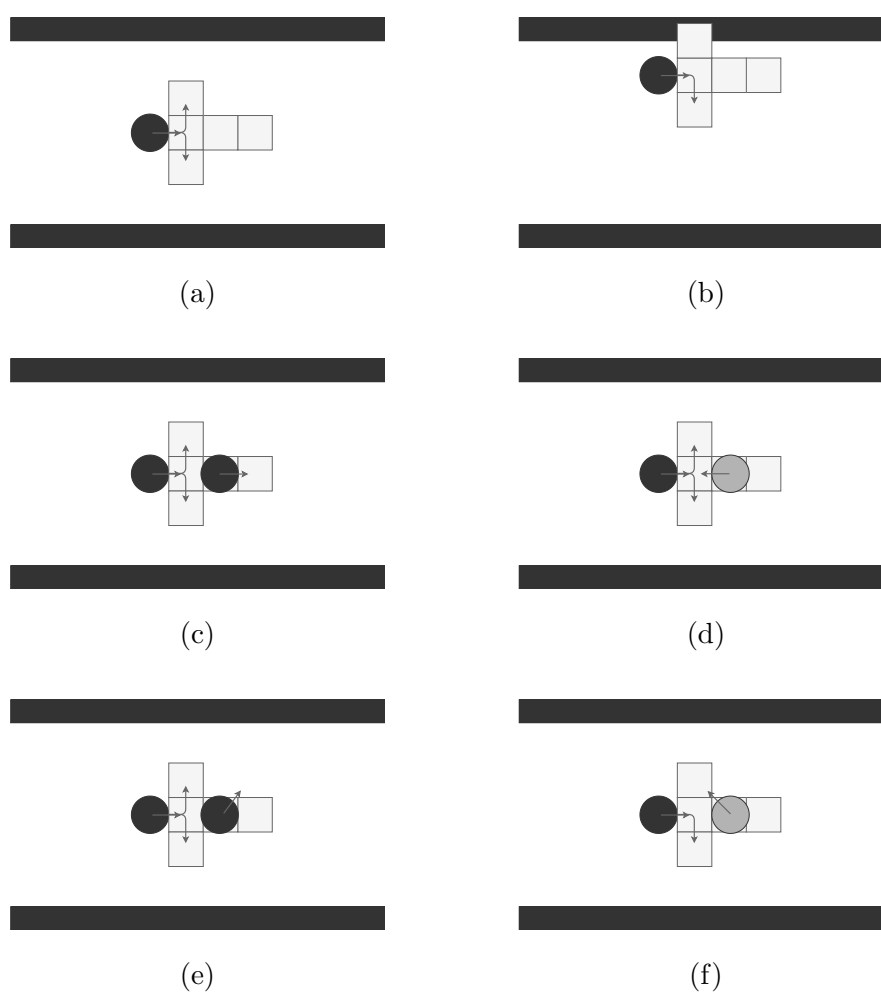


Figura 3.10: Reglas de evasión.

8 Si el peatón percibe un solo compañero lateral, entonces puede girar y avanzar o simplemente avanzar (figura 3.11c).

9 Si el peatón percibe únicamente dos compañeros laterales, entonces solo puede avanzar pero no girar (figura 3.11d).

Las siguientes reglas resuelven casos combinados donde el peatón puede encontrarse con un compañero ya sea lateral o frontal y con pared.

10 Si el peatón percibe pared lateral y compañero frontal, entonces puede girar hacia el lado opuesto de la pared y avanzar (figura 3.12a), o simplemente avanzar.

11 Si el peatón percibe pared lateral, compañero lateral y frontal, entonces puede avanzar un paso solo si el frente está libre, si no está libre el frente, entonces se queda inmóvil (figura 3.12b).

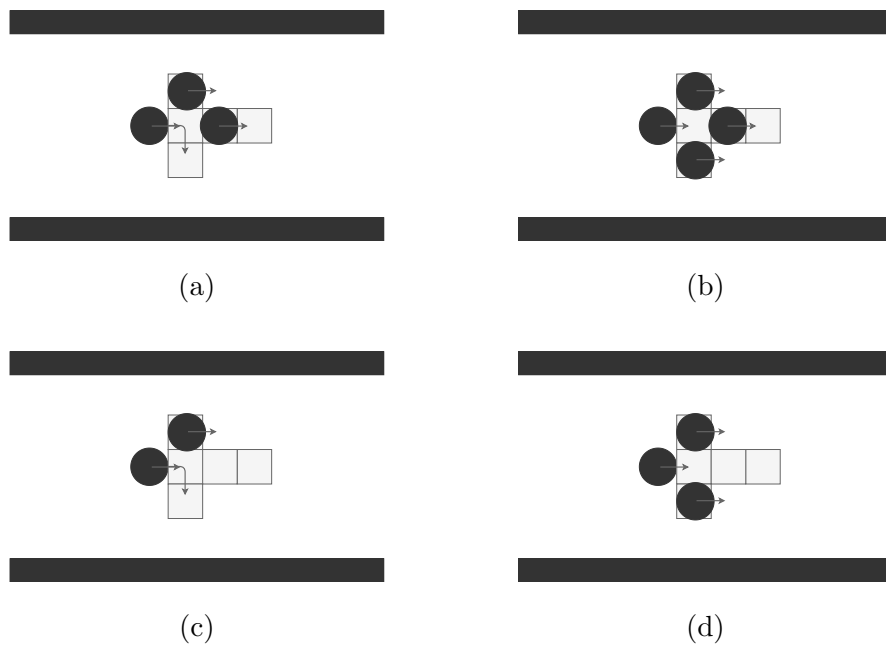


Figura 3.11: Reglas de evasión compuestas.

12 Si el peatón percibe únicamente pared lateral y compañero lateral, entonces solamente avanza (figura 3.12c).

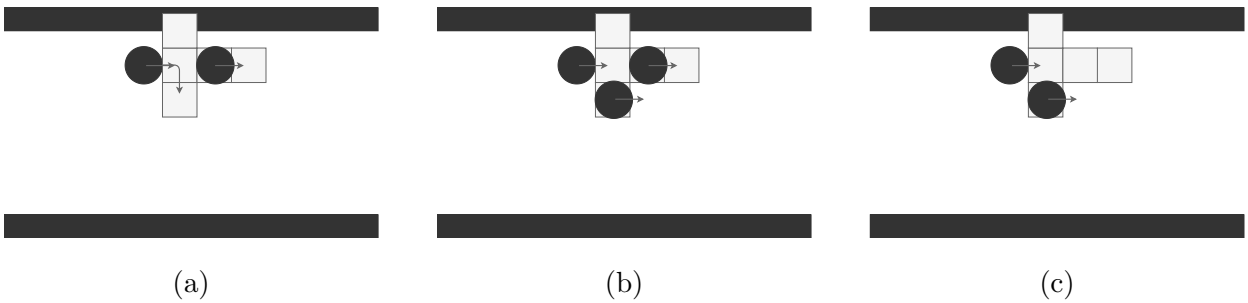


Figura 3.12: Reglas de evasión combinadas.

Cuando el peatón no está alineado con respecto al pasillo, este cambia su secuencia de caminata yendo hacia adelante un paso, si se le es permitido. Posteriormente gira con el objeto de alinearse al pasillo. Las siguientes reglas resuelven situaciones de no alineación.

13 Si el peatón está desalineado con respecto al pasillo y percibe caminata libre, entonces avanza y gira para alinearse (figura 3.13a).

14 Si el peatón está desalineado con respecto al pasillo y percibe pared, entonces avanza y gira para alinearse sólo si no hay obstrucción por parte de otro peatón (figura 3.13b).

- 15 Si el peatón está desalineado y percibe a un compañero frontal en flujo, entonces avanza solo si el siguiente paso está libre (figura 3.13c).
- 16 Si el peatón está desalineado y percibe pared y algún otro compañero, avanza solo si hay espacio libre (figura 3.13d).

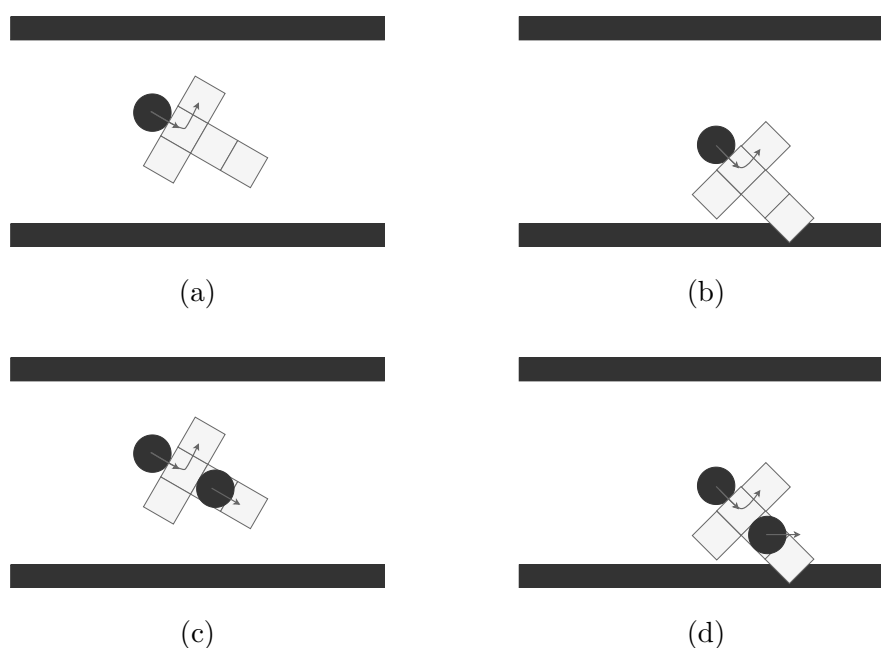


Figura 3.13: Reglas de evasión para peatones desalineados.

### 3.3.3. Actuación

El módulo de actuación o acción es el encargado de implementar las decisiones hechas por el agente actualizando las variables de estado (la posición  $(x, y, \theta)$ , el tamaño de paso  $v$  y el tamaño de giro  $\omega$ ). El módulo evalúa si el agente está alineado con respecto a las paredes del pasillo. Si no está alineado entonces gira y posteriormente avanza, si lo está, entonces lleva a cabo la acción contraria que consiste de avanzar y posteriormente girar.

Esto lo hace debido a que el comportamiento de caminata de un peatón real no es en línea recta. Si no que es errático, y cambia aleatoriamente entre avanzar, girar a la izquierda o hacia la derecha.

### 3.3.4. Proceso de caminata

El proceso de caminata consiste de un ciclo constituido por los módulos de percepción, toma de decisiones y acción el cual está en constante ejecución durante la simulación. Estos módulos del agente se encuentran interconectados en ese orden. El proceso de caminata puede describirse algorítmicamente como sigue:

1. **Percibir:** El agente adquiere información del medio (campo perceptual) y de si mismo (propiocepción).
2. **Tomar decisiones:** El agente decide entre girar o avanzar. Si encuentra un obstáculo
3. **Actuar:** El agente actualiza su posición  $(x,y)$  en el pasillo aplicando transiciones de estados. La acción en este caso es un mapeo directo entre situación reacción.

Los anteriores son los componentes principales que constituyen el agente en el entorno bidireccional. El agente es el mismo para cada escenario y los escenarios van modificándose gradualmente con el objeto de medir el flujo peatonal y observar los cambios cualitativos y cuantitativos para cada escenario en contraflujo.

# Capítulo 4

## Resultados

Los resultados del simulador se presentan de forma cuantitativa a través del diagrama fundamental de flujo y el diagrama de actividad. El primero evalúa la velocidad promedio de la multitud ( $m/s$ ) contra densidad ( $1/m^2$ ). En este caso la densidad es igual a la cantidad de peatones en el corredor, debido a que por cada metro cuadrado se tiene un peatón. El diagrama fundamental contiene en el eje  $x$  la variación de densidad para los pasillos y en el eje  $y$  la velocidad promedio de la multitud. Por otra parte, la gráfica de actividad promedio muestra el uso promedio de las reglas para resolver conflictos, ambas gráficas guardan una relación de simetría. También se presentan los resultados de manera descriptiva o cualitativa a través de formación de patrones en el corredor.

### 4.1. Configuración de los experimentos

Se realizaron experimentos para los primeros tres pasillos. Para cada uno de ellos, se estableció un ancho de **11** parcelas (**patches**) con una densidad inicial de **10 peatones** distribuidos linealmente de manera aleatoria a lo largo del pasillo. Los resultados muestran una **región crítica** distinta para cada ambiente. Esta región significa que el conglomerado comienza a saturarse formando cúmulos de atasco debido a la cantidad de peatones y a la estructura del corredor. En las gráficas esto se representa a través de fluctuaciones, unas más prolongadas que otras. Para cada gráfica se muestra la evolución de la velocidad promedio contra densidad para cada uno de estos tres pasillos antes mencionados. La simulación se dejó hasta alcanzar una densidad de mil peatones.

## 4.2. Pasillo estándar

En la figura 4.1 se muestra la evolución en el tiempo para el **pasillo estándar**, conforme la densidad aumenta y corre la simulación, se llega a un estado estacionario alrededor de 350 peatones. Estos representan patrones de flujo estacionarios en la densidad que cambian de lugar al continuar la simulación. Los atascos se deben a que los peatones van perdiendo la capacidad de resolver el flujo (uso de sus reglas) debido a la sobrepoblación en el corredor y a la anchura del pasillo, esto se traduce a una **región crítica** en el diagrama fundamental de flujo.

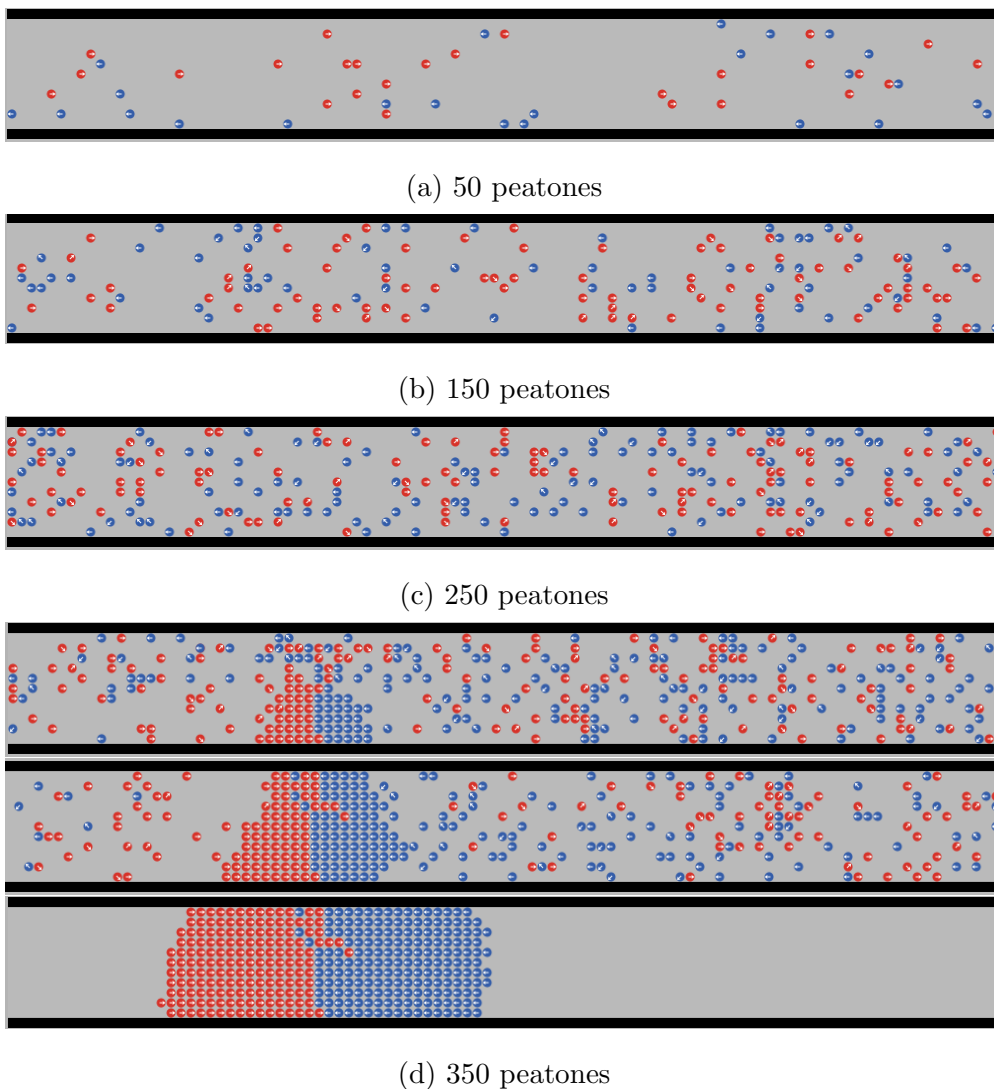


Figura 4.1: Evolución en el tiempo de los peatones para el **pasillo estándar**. Alrededor de 350 peatones comienzan a formarse atascos en el pasillo.

Se observa que la gráfica de flujo para el **pasillo estándar** (figura 4.2) tiene una caída

con fluctuaciones grandes, es decir, una vez que cae busca recuperar el flujo con una subida abrupta, sin embargo posteriormente ya no recupera el flujo. El rango de densidad de su **región crítica** es de 280 a 400 peatones. Esto significa que en este rango específico de densidad comienzan a formarse atascos en el pasillo y los peatones van perdiendo la capacidad de resolver encuentros.

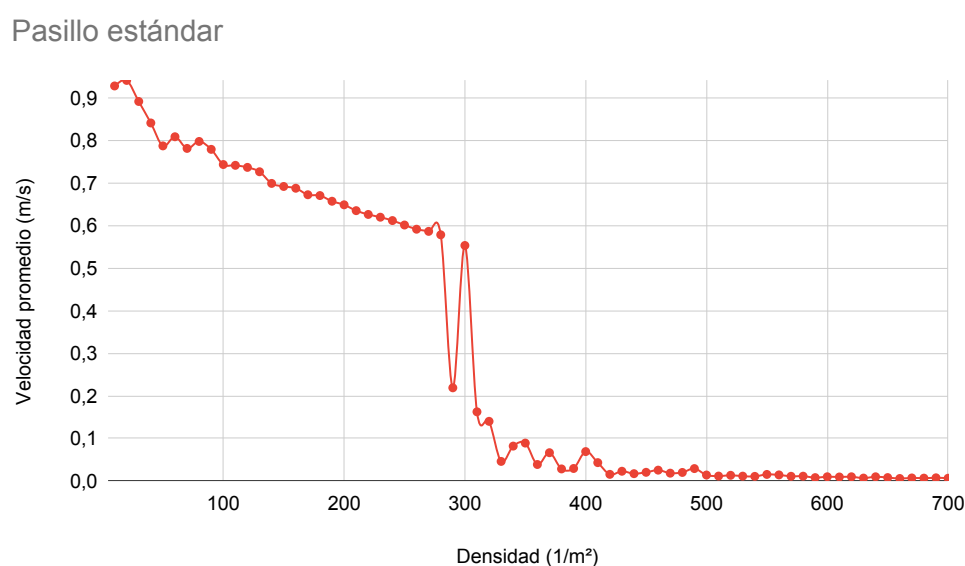


Figura 4.2: velocidad promedio *vs* densidad para el pasillo estándar.

El diagrama de actividad en la figura 4.3 muestra el promedio de uso de las reglas en función de la densidad. La actividad es el número promedio de reglas que usan los peatones para resolver encuentros. En este caso se tiene el mismo fenómeno que para la velocidad promedio en sus zonas críticas. La gráfica es simétrica con respecto a la anterior debido a que conforme la densidad aumenta, el uso de las reglas por parte de la multitud también aumenta.

### 4.3. Pasillo con salidas laterales

Las instantáneas para el **pasillo con salidas laterales** se muestra en la figura 4.4, se considera una muestra de 50 a 350 peatones para comparar con los demás pasillos. En este escenario se observa más una tendencia a formar veredas de seguimiento y las salidas laterales facilitan al flujo del conglomerado. Sin embargo en 350 peatones comienzan a formarse los atascos de igual manera. Para este pasillo se tiene también una **región crítica** que se cuantifica en el diagrama fundamental de flujo que se muestra a continuación. El **pasillo**

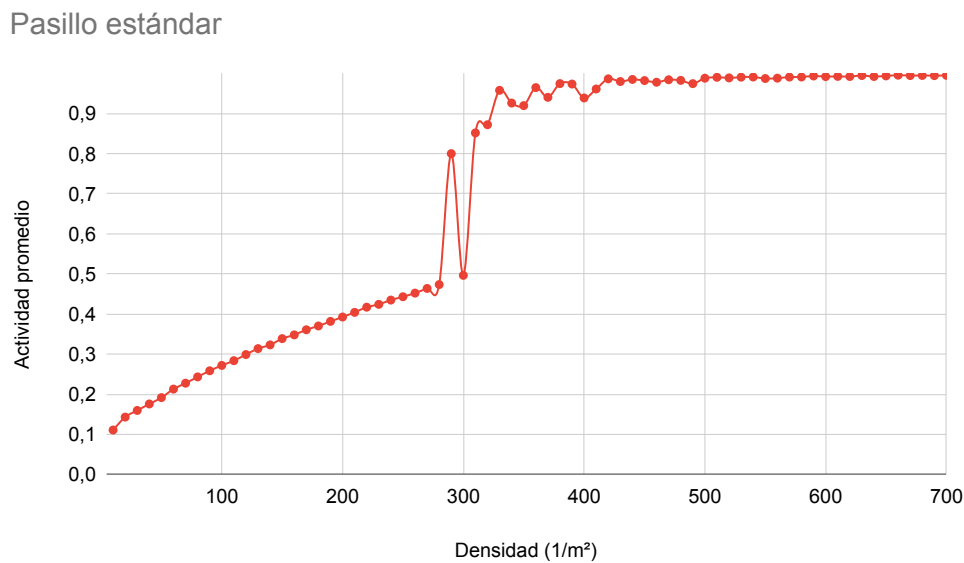


Figura 4.3: Diagrama de actividad para el pasillo estándar.

con salidas laterales recupera el flujo (figura 4.5). Tiene las fluctuaciones en la región crítica, pero luego se vuelve a recuperar el flujo. Este pasillo tiene el fenómeno de amplificar su **región crítica** en un rango de 260 a 540 peatones. Entonces se puede decir que el pasillo con aperturas o salidas laterales tiene una persistencia al flujo.

El diagrama de actividad para el **pasillo con salidas laterales** (figura 4.6) también tiene una tendencia simétrica en comparación a su diagrama de flujo. En este caso la **región crítica** consiste en el rango de saturación de las reglas para resolver encuentros frontales, laterales o combinados debido al aumento de la densidad en el pasillo.

En comparación al pasillo estándar, el pasillo con aperturas laterales presenta un mayor número de fluctuaciones. Este hecho se debe a la adición de las aperturas laterales, las cuales relajan más el flujo peatonal, lo que hace que la gráfica estabilice mucho después.

## 4.4. Pasillo fragmentado en dos

Para el caso del **pasillo fragmentado** en la figura 4.7, se observa como se modifica el patrón de flujo al modificar el pasillo con salidas laterales. En particular se modifican los cúmulos de atasco representativos y la formación de veredas se vuelve más notoria. En este pasillo se tomaron muestras de entre 50 a 350 peatones, la cuál es el inicio de una

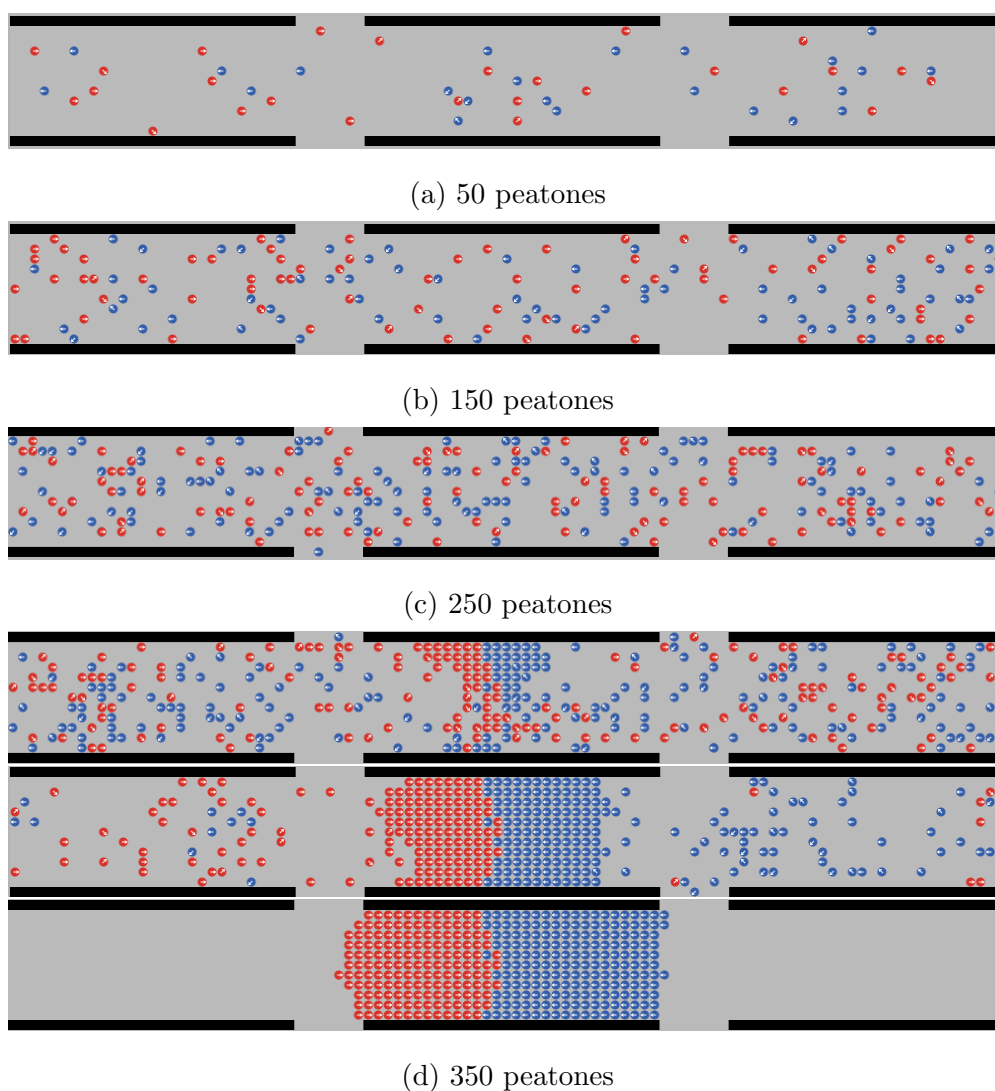
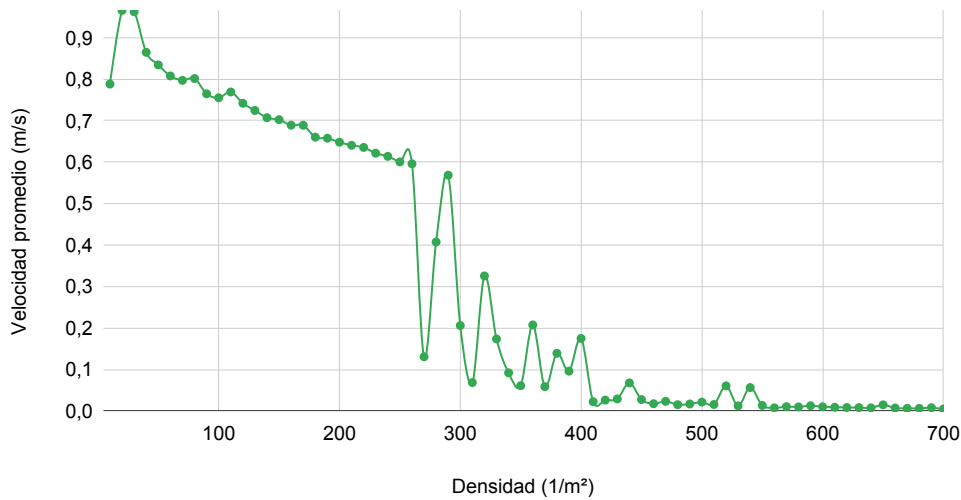


Figura 4.4: En el **pasillo con salidas laterales** los peatones tienen una tendencia mas hacia formar veredas de seguimiento.

**región crítica**, donde comienzan a formarse patrones de estancamiento. Para este pasillo se muestran tres momentos de atasco, primero se forma el atasco del lado derecho del corredor, se deshace y luego se vuelve a formar del lado izquierdo. Por ultimo, se forma en el lado derecho otra vez y ya no se deshace debido a que los peatones cesan su capacidad de resolver encuentros.

Para el **pasillo fragmentado** (figura 4.8), este tiene un comportamiento parecido al pasillo estándar porque realiza fluctuaciones pero no tiene persistencia en el flujo. También tiene la tendencia de ampliar su **región crítica** (de 290 a 370 peatones). Este pasillo se estabiliza en 370 peatones, lo que significa que estabiliza antes que el pasillo estándar. Los tres pasillos

Pasillo con salidas laterales

Figura 4.5: velocidad promedio *vs* densidad para el pasillo con salidas laterales.

estabilizan al termino de su zona crítica.

El diagrama de actividad para el pasillo fragmentado se muestra en la figura 4.9, se observa nuevamente una simetría con respecto a la gráfica del flujo. Cercano a una densidad de 300 peatones se observa una subida abrupta en el uso promedio de las reglas, este es un indicio de saturación en el pasillo, posteriormente los peatones se auto-organizan haciendo uso nuevamente de sus reglas de evasión, y finalmente el sistema se satura al punto de no poder resolver mas encuentros.

En la figura 4.10 se muestra el **diagrama fundamental de flujo** para los tres corredores. En comparación al diagrama fundamental de flujo del pasillo estándar se puede observar que el pasillo fragmentado reduce el ancho de densidad de la zona crítica (región de fluctuaciones grandes) mientras que el pasillo con salidas laterales amplía la región crítica de densidad en un proceso de persistencia de flujo.

En la región crítica de fluctuaciones grandes del flujo promedio se generan los patrones de flujo y los patrones de atasco que se observan en los diagramas de los pasillos anteriores.

En la figura 4.11 se presenta el **diagrama de actividad** para estos tres pasillos. Se observa efectivamente que para cada ambiente dado se tiene una región crítica distinta en la actividad. Para el pasillo estándar la región crítica es angosta, en un rango de densidad de entre 280 a

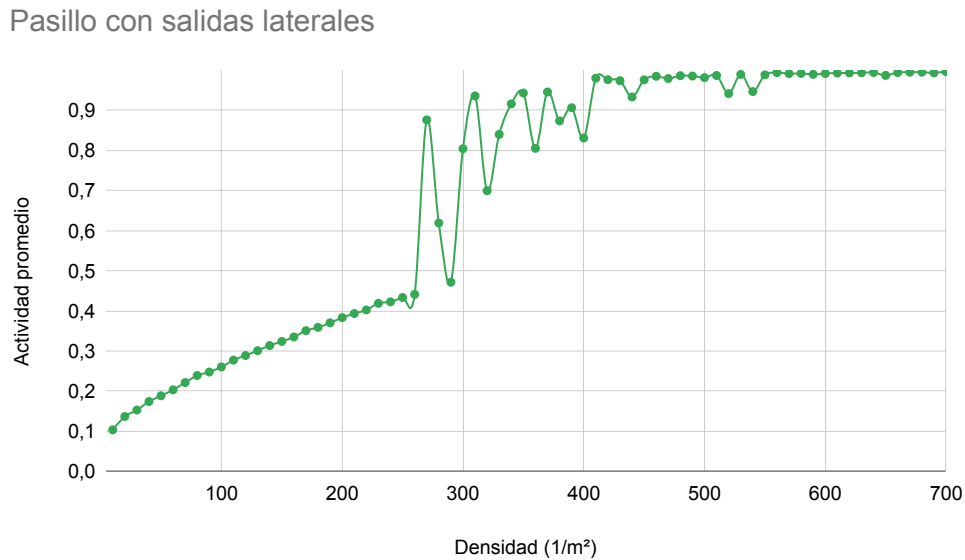


Figura 4.6: Diagrama de actividad para el pasillo con salidas laterales.

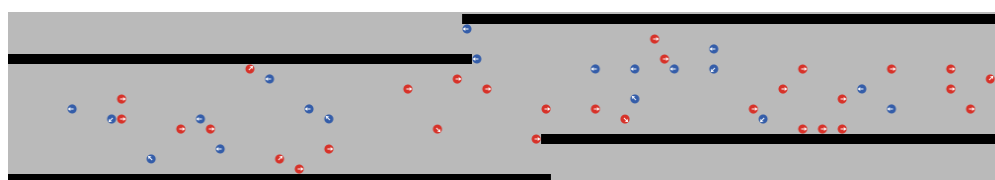
300 peatones. Para el caso del pasillo fragmentado en dos, la región crítica es prácticamente similar al del pasillo estándar (290 a 330 peatones), siendo este el rango crítico de saturación de las reglas. Por último, el pasillo con salidas laterales es bastante distinto en la frecuencia de uso de las reglas de evasión. A una densidad de 290 peatones comienza una subida abrupta en el uso promedio de las reglas, posteriormente comienzan las fluctuaciones que muestran bastante persistencia y finalmente se saturan a una densidad de 410 peatones. Los peatones dejan de resolver encuentros en el pasillo.

La siguiente tabla 4.1 muestra en resumen, los resultados obtenidos para cada pasillo bidireccional en comparación con el pasillo estándar. Se observa que para el pasillo con salidas laterales, la región crítica inicia antes y es más amplia. flujo máximo del pasillo con salidas laterales que corresponde al flujo alcanzado en el mayor punto de densidad es de 0.60. Se observa que para los demás pasillos el flujo máximo es similar, así como la actividad máxima. Es decir, la densidad en el pasillo donde existe mayor actividad.

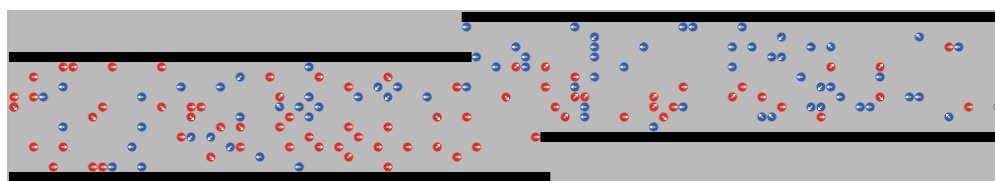
Se observa también que para la zona crítica del pasillo estándar y el pasillo fragmentado en dos, su amplitud es ligeramente similar, sin embargo el pasillo fragmentado muestra franjas en diagonal, mientras que el pasillo estándar simplemente atascos intermitentes.

Comparación de resultados obtenidos					
Pasillos en contraflujo	Región crítica	Flujo máximo ( $ms^{-1}$ )	Actividad máxima	Densidad ( $1/m^2$ )	Patrones
Estándar	280 a 400 (peatones)	0.58	0.94	1000 peatones	Atascos intermitentes
Salidas laterales	260 a 540 (peatones)	0.60	0.93	1000 peatones	Leve formación de veredas
Fragmentado en dos	290 a 370 (peatones)	0.57	0.93	1000 peatones	Formación de franjas en diagonal y atascos intermitentes

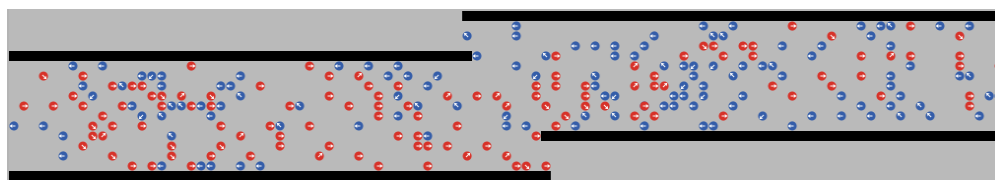
Tabla 4.1: Tabla comparativa con respecto al pasillo bidireccional estándar.



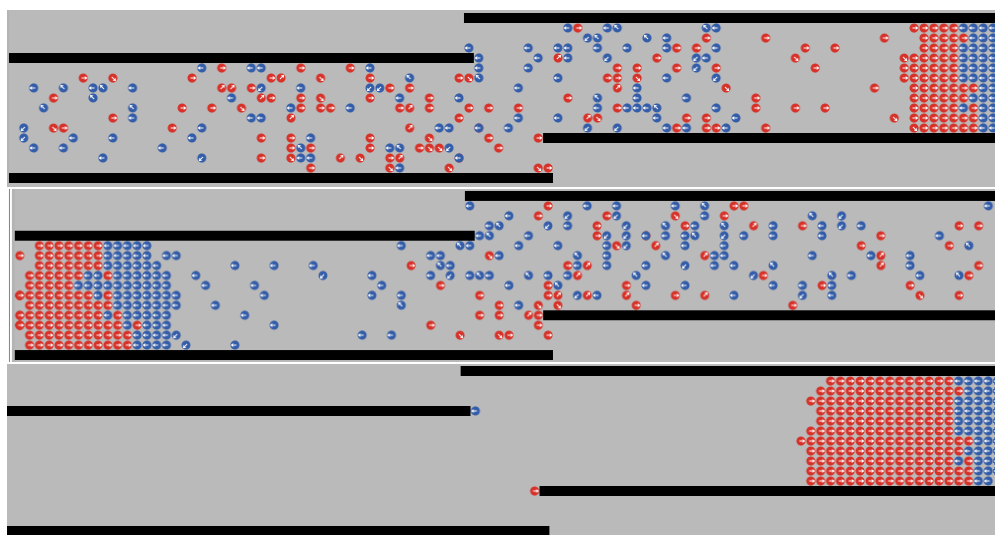
(a) 50 peatones



(b) 150 peatones



(c) 250 peatones



(d) 350 peatones

Figura 4.7: Muestra la evolución de los peatones para el **pasillo fragmentado**, en (d) se observa un patrón de atasco.

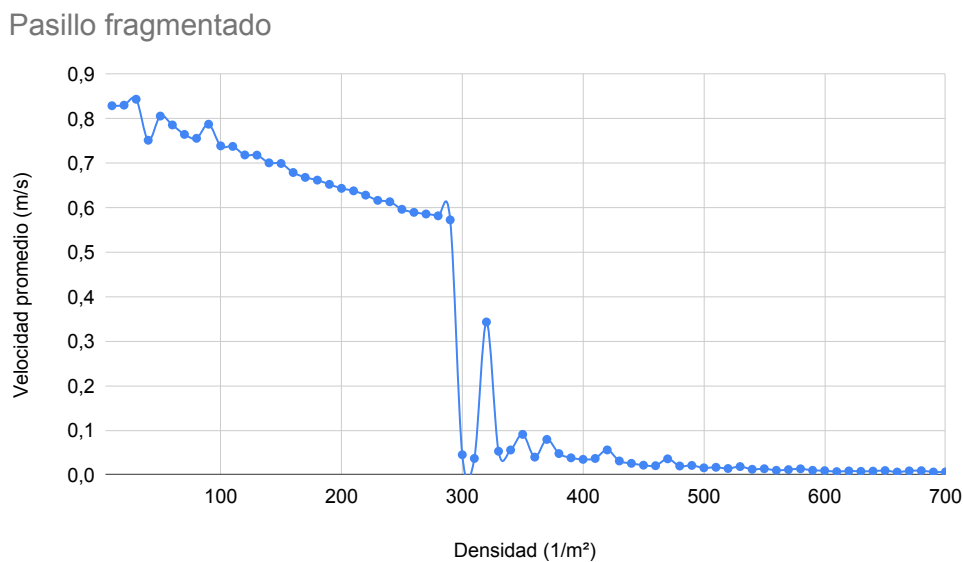


Figura 4.8: velocidad promedio *vs* densidad para el pasillo fragmentado.

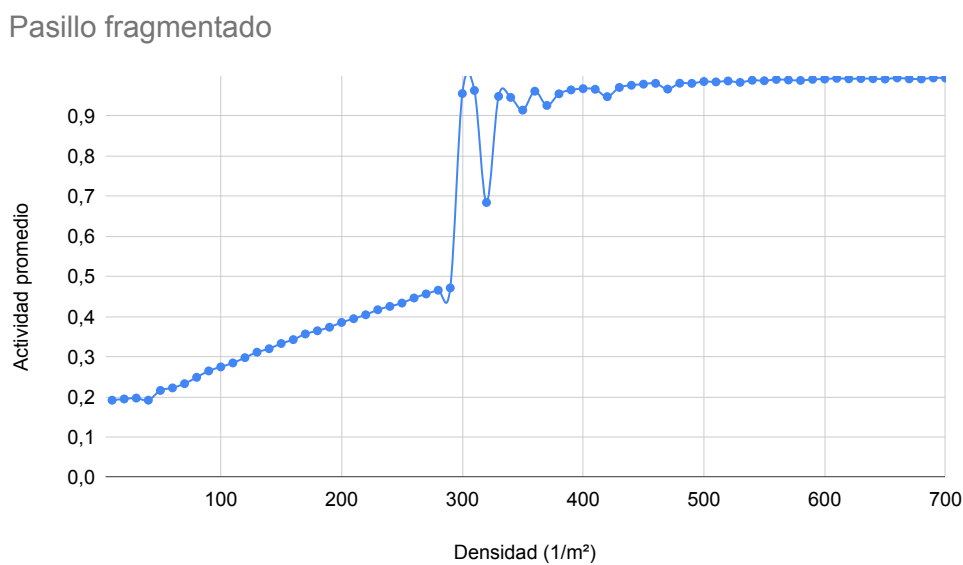


Figura 4.9: Diagrama de actividad para el pasillo fragmentado.

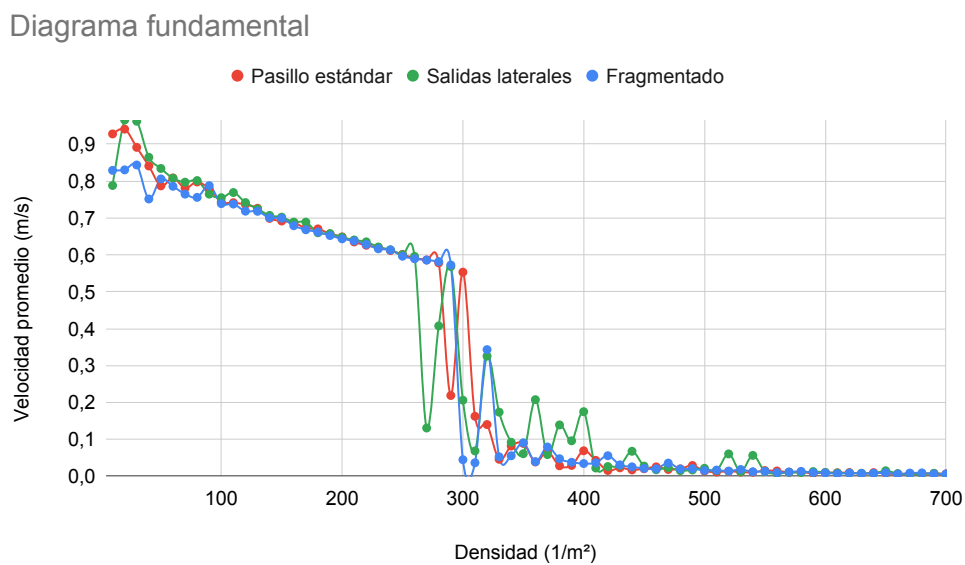


Figura 4.10: Diagrama fundamental de flujo para la velocidad promedio *vs* densidad de los tres pasillos.

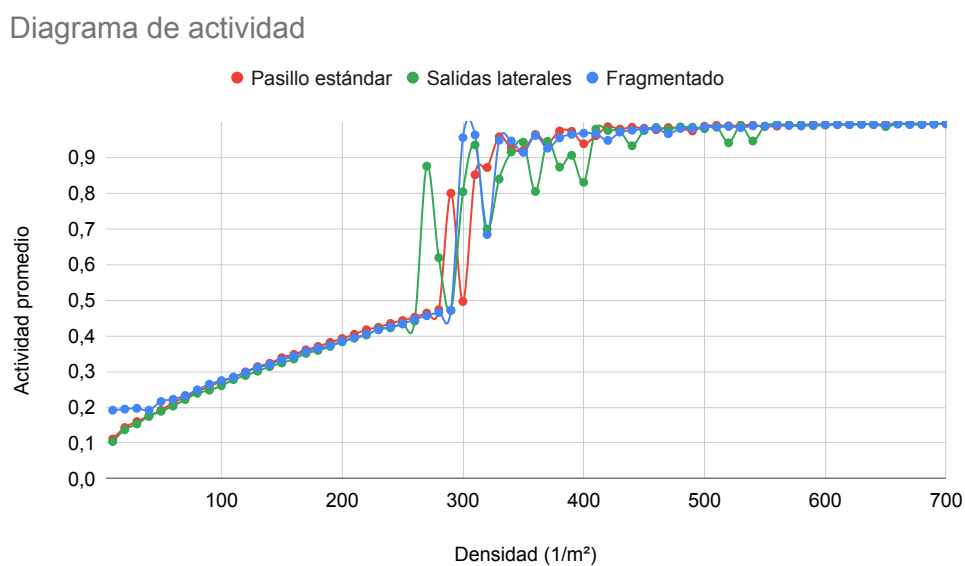


Figura 4.11: Diagrama de actividad para los tres pasillos.

# Capítulo 5

## Conclusiones y trabajo a futuro

En esta tesis se elaboró e implementó un sistema multiagente haciendo uso de los principios del modelado basado en agentes (ABM) con la intención de resolver el flujo de conglomerados de manera autónoma para una serie de ambientes bidireccionales propuestos. De los resultados previamente obtenidos se puede concluir lo siguiente:

El sistema multiagente es capaz de resolver el flujo para los pasillos propuestos. De esta forma, cada pasillo tiene una zona crítica distinta en relación al flujo y en relación a la actividad promedio. Para cada gráfica se distinguen tres intervalos: un intervalo a alta densidad, un intervalo de zona crítica y por último un intervalo a alta densidad, el cual corresponde a la región de formación de atascos en el pasillo. Cada pasillo reproduce una zona crítica distinta, para algunos esta es mas ancha, o se observa una tendencia a recuperar el flujo. Para otros, la zona crítica es mas angosta y no presentan una recuperación en el flujo. Los patrones espaciales observados en los pasillos dependen de factores como el número de salidas o la forma del pasillo. Para algunos pasillos la formación de veredas es evidente mientras que en otros es difícil de observar e interpretar.

El pasillo estándar tiene su zona crítica en un intervalo de densidad de entre 280 a 400 peatones. Las fluctuaciones representan un intento del sistema por recuperar el flujo a este rango de densidad. En la gráfica se observa que el flujo no se detiene de manera súbita (i.e., no llega a cero) debido a que las salidas en los extremos del pasillo no se saturan como lo es el pasillo fragmentado, esto permite que el flujo peatonal continúe hasta estabilizarse en una densidad de 400 peatones en adelante. Sin embargo es similar a la zona crítica del pasillo fragmentado, pero diferente en la tendencia a recuperar el flujo.

A una densidad de 150 peatones es difícil observar veredas, sin embargo se identifican tenues líneas de seguimiento que emergen de manera espontánea a esa densidad, posterior a esta etapa se forman los atascos.

Para el pasillo con salidas laterales se tiene una zona crítica de entre 260 a 540 peatones. La gráfica de flujo o velocidad promedio cae abruptamente en 260 y posteriormente recupera el flujo de manera momentánea. La gráfica tiene un mayor número de fluctuaciones debido a las salidas laterales que relajan el flujo del conglomerado provocando que la región crítica sea mas amplia en comparación a los demás pasillos.

Se observa un patrón de atasco distinto en comparación a los demás pasillos, los cúmulos de atasco se observan en el medio del pasillo dado que las salidas laterales relajan el flujo en el ambiente. Este pasillo tiene una mayor tendencia a formar veredas de seguimiento las cuales se observan a una densidad de 350 peatones. Por otra parte, desde un punto de vista aplicativo, esto demuestra que el agregar salidas laterales a un pasillo en contraflujo es mas eficiente que fragmentar el pasillo por la mitad.

El pasillo fragmentado presenta una caída abrupta en el flujo peatonal, la velocidad promedio disminuye a cero, incrementa y posteriormente se estabiliza. El intervalo de su región crítica corresponda a una densidad de entre 290 a 370 peatones. A pesar de que la gráfica de flujo del pasillo fragmentado tiene un comportamiento similar al del pasillo estándar, esta tendencia de disminución del flujo a cero, corresponde al atasco en los extremos del pasillo lo cual detiene el flujo del conglomerado de manera momentánea.

Los patrones espaciales que se reportan para el pasillo fragmentado se identifican como líneas de seguimiento en diagonal o franjas en diagonal, el cual emerge debido a la nueva estructuración de fragmentar el pasillo en dos. Los patrones de atasco se forman en los extremos de manera alternante conforme avanza la simulación.

Las contribuciones al campo de estudio de la dinámica de peatones y los sistemas multiagente se centran en el modelo de simulación multiagente basado en reglas simples, sin la necesidad de guardar gran cantidad de información para el procesamiento de la dinámica de peatones para pasillos bidireccionales. Posteriormente se deberá evaluar si el sistema es funcional para otros pasillos complejos como obstáculos, rampas o pasillos en intersecciones. Es decir, a que

grado existe la necesidad de cambiar las reglas para que los peatones puedan resolver estos pasillos antes mencionados. Esto último es lo que se pretende como trabajo a futuro.

# Referencias

1. Anna, S., Jette, S., & Armin, S. (2017). *Collective phenomena in crowds—Where pedestrian dynamics need social psychology*. PLoS one, 12(6).
2. Aghabayk, K., Radmehr, K., & Shiwakoti, N. (2020). *Effect of Intersecting Angle on Pedestrian Crowd Flow under Normal and Evacuation Conditions*. Sustainability, 12(4), 1301.
3. Batty, M., Jiang, B., & Thurstain-Goodwin, M. (1998). *Local movement: agent-based models of pedestrian flows*.
4. Bakar, N. A. A., Majid, M. A., & Ismail, K. A. (2017). *An overview of crowd evacuation simulation*. Advanced Science Letters, 23(11), 11428-11431.
5. Ballinas-Hernández A. L., Muñoz-Meléndez A. & Rangel-Huerta A., (2011). *Multiagent System Applied to the Modeling and Simulation of Pedestrian Traffic in Counterflow*. Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 14 (3) 2. 10.18564/jasss.1789
6. Ciolek, M. T. (1978). *Spatial behavior in pedestrian areas*. Ekistics, 120-122.
7. Cividini, J., Hilhorst, H. J., & Appert-Rolland, C. (2013). *Crossing pedestrian traffic flows, the diagonal stripe pattern, and the chevron effect*. Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 46(34), 345002.
8. Cristiani, E., Piccoli, B., & Tosin, A. (2014). *Multiscale modeling of pedestrian dynamics (Vol. 12)*. Springer.
9. Dijkstra, J., Timmermans, H. J., & Jessurun, A. J. (2001). *A multi-agent cellular automata system for visualising simulated pedestrian activity*. In Theory and Practical Issues on Cellular Automata (pp. 29-36). Springer, London.

10. Dai, J., Li, X., & Liu, L. (2013). *Simulation of pedestrian counter flow through bottlenecks by using an agent-based model*. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 392(9), 2202-2211.
11. Fruin, J. J. (1971). *Pedestrian planning and design*. (No. 206 pp).
12. Gilbert, N., & Troitzsch, K. (2005). *Simulation for the social scientist*. McGraw-Hill Education (UK).
13. Hankin, B. D., & Wright, R. A. (1958). *Passenger flow in subways*. *Journal of the Operational Research Society*, 9(2), 81-88.
14. Henderson, L. F. (1974). *On the fluid mechanics of human crowd motion*. *Transportation research*, 8(6), 509-515.
15. Helbing, D., & Molnar, P. (1998). *Social Force Model for Pedestrian Dynamics*. *Physical Review E*. 51. 10.1103/PhysRevE.51.4282.
16. 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.
17. 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.
18. Helbing, D., & Johansson, A. (2013). *Pedestrian, crowd, and evacuation dynamics*. arXiv preprint arXiv:1309.1609.
19. Hoogendoorn, S. P., & Bovy, P. H. (2002). *Normative pedestrian behaviour theory and modelling*. In *Proceedings of the 15th international symposium on transportation and traffic theory* (pp. 219-245).
20. Hughes, R. L. (2003). *The flow of human crowds*. *Annual review of fluid mechanics*, 35(1), 169-182.
21. Heliövaara, S., Korhonen, T., Hostikka, S., & Ehtamo, H. (2012). *Counterflow model for agent-based simulation of crowd dynamics*. *Building and Environment*, 48, 89-100.

22. Hussein, M., & Sayed, T. (2017). *A bi-directional agent-based pedestrian microscopic model*. *Transportmetrica A: Transport Science*, 13(4), 326-355.
23. Jiang, B. (1999). *SimPed: simulating pedestrian flows in a virtual urban environment*. *Journal of geographic information and decision analysis*, 3(1), 21-30.
24. Jennings, N. R. (2000). *On agent-based software engineering*. *Artificial intelligence*, 117(2), 277-296.
25. Kretz, T., Grünebohm, A., Kaufman, M., Mazur, F., & Schreckenberg, M. (2006). *Experimental study of pedestrian counterflow in a corridor*. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2006(10), P10001.
26. 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.
27. Navin, F. P., & Wheeler, R. J. (1969). *Pedestrian flow characteristics*. *Traffic Engineering, Inst Traffic Engr*, 39.
28. Russell, S., & Norvig, P. (2002). *Artificial intelligence: a modern approach*.
29. Ronald, N., Sterling, L., & Kirley, M. (2007). *An agent-based approach to modelling pedestrian behaviour*. *International Journal of Simulation*, 8(1), 25-38.
30. Rangel-Huerta, A., & Muñoz-Meléndez, A. (2010). *Kinetic theory of situated agents applied to pedestrian flow in a corridor*. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389(5), 1077-1089.
31. Railsback, S. F., & Grimm, V. (2019). *Agent-based and individual-based modeling: a practical introduction*. Princeton university press.
32. Schadschneider, A., & Seyfried, A. (2008). *Fundamental diagram and validation of crowd models*. In *International Conference on Cellular Automata* (pp. 563-566). Springer, Berlin, Heidelberg.
33. Schadschneider, A., Burstedde, C., Klauck, K., & 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.

- 
34. Schadschneider, A., Boltes, M., Zhang, J., Tordeux, A., & Seyfried, A. (2019) *Empirical Results of Pedestrian and Evacuation Dynamics*. In: Kerner B. (eds) *Complex Dynamics of Traffic Management*. Encyclopedia of Complexity and Systems Science Series. Springer, New York, NY.
  35. Wilensky, U. (1999). NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
  36. Wilensky, U., & Rand, W. (2015). *An introduction to agent-based modeling: modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo*. Mit Press.
  37. Wooldridge, M. J., & Jennings, N. R. (1995). *Intelligent agents: Theory and practice*. The knowledge engineering review, 10(2), 115-152.
  38. Weiss, G. (Ed.). (2013). *Multiagent systems*. MIT press.