

Dinámica en evacuaciones de emergencia con
visibilidad variable

Autor:

Patricio Montaron

Director:

Dr. Guillermo Frank

Co-Director:

Dr. Claudio Dorso



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

DEPARTAMENTO DE FÍSICA J. J. GIAMBIAGI.

Julio - 2023

Título: “Dinámica en evacuaciones de emergencia con visibilidad variable”.

Área: Mecánica estadística.

Estudiante: Patricio Montaron.

LU: 681/12

Lugar de trabajo: Departamento de Física. FCEN, UBA.

Director de tesis: Dr. Guillermo Frank.

Codirector de tesis: Dr. Claudio Dorso.

Nombre de los colaboradores: Ignacio Sticco y Fernando Cornes

Fecha de inicio: 23 de Marzo de 2022

Fecha de finalización: 31 de Julio de 2023

Fecha de examen:

Informe final aprobado por:

Patricio Montaron

Autor

Dr. Guillermo Frank

Director

Dr. Claudio Dorso

Codirector

Jurado

Jurado

Jurado

Profesor a cargo

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	3
2. Marco teórico	5
2.1. Modelo de Fuerza Social (básico)	5
2.2. Blocking Clusters	8
2.3. Algoritmo de integración de Verlet	9
2.4. Faster is Slower y Faster is Faster	10
3. Simulaciones	11
3.1. Condiciones de la simulación	12
3.2. Tipos de comportamientos estudiados	14
3.2.1. Caminata aleatoria	14
3.2.2. Seguimiento de la pared	14
3.2.3. Presencia de un guía	14
4. Resultados	15
4.1. Caminata aleatoria	15
4.1.1. Puerta angosta	16
4.1.2. Puerta ancha	20
4.2. Evacuación con seguimiento de la pared	22
4.2.1. Puerta angosta	22
4.2.2. Puerta ancha	23
4.3. Comportamiento guiado	24

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	III
4.3.1. Presencia de un líder en el centro de la habitación	25
4.3.2. Presencia de un líder en una pared perpendicular a la puerta	26
5. Comparación respecto de comportamientos guiados	29
5.1. Comparaciones para evacuación con caminata aleatoria	29
5.1.1. Caminata aleatoria vs Líder centrado	30
5.2. Comparaciones para evacuación siguiendo la pared.	34
5.3. Comparaciones entre evacuaciones guiadas	36
5.3.1. Líder centrado vs Líder contra una pared	36
6. Conclusiones	39
Agradecimientos	42
Contacto	43
Apéndices	44
Referencias Bibliográficas	52

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

En las últimas décadas, los estudios de evacuaciones en situación de emergencia, y las consecuentes propuestas de mejora, cobraron importancia frente al crecimiento de eventos masivos. En los últimos 30 años surgieron modelos basados en la dinámica de fluidos [1–3], modelos de gases cinéticos [4–6], autómatas celulares (tipo *lattice gas*) [7–9], modelos basados en agentes [10–13], modelos basados en redes [14, 15] o el modelo de Fuerza Social [16–27].

En particular, esta investigación se centrará en estudiar diversas estrategias de evacuación en condiciones de visibilidad variable utilizando el modelo de Fuerza Social [16, 17]. A partir de algunos ejemplos, como el incendio del metro de Bakú (1995) o el túnel de Mont Blanc (1999), el funicular de Kaprun (2000), o las tragedias en clubes nocturnos como *The Station* (2003) o Cromañón (2004), distintos autores realizaron estudios y simulaciones numéricas con el objetivo mejorar el modelo para incluir la mayor cantidad de fenómenos presentes en evacuaciones.

De esta manera, se pueden encontrar en la literatura, estudios para distintos anchos de la puerta de salida [28–36], su posición [29, 37] o incluso la presencia de obstáculos frente a la misma [19, 38]. Por otro lado, hay análisis sobre los comportamientos de los indivi-

duos, como por ejemplo, trabajos que observen la composición de los grupos de individuos al evacuar [20, 33, 39], el efecto de humo que afecta la visibilidad a la hora de evacuar [21, 22, 40], o las densidades máximas para evacuaciones seguras [41, 42].

Estos últimos estudios, plantean que la máxima densidad que se puede alcanzar para una persona que ocupa un área $0,12 \text{ m}^2$ (aproximando a la persona por una elipse con ejes de 50 cm y 30 cm) está entre 7 y 9 personas/ m^2 . Sin embargo, frente a la ausencia de fuerzas externas que obligan a los individuos a comprimirse, observaron que los mismos alcanzan densidades máximas entre 5 y 6 personas/ m^2 , aunque la mayoría de los eventos no presentan densidades mayores a 4 personas/ m^2 en las zonas más congestionadas [41, 42]. En este mismo trabajo [41], consideran que los valores de densidad que presentan un riesgo son iguales o mayores a 6 p/ m^2 , ya que a partir de estas densidades no queda lugar para moverse libremente e impide a los individuos responder a fuerzas externas. Esto puede producir asfixia o daño a órganos en caso de que se genere una estampida o una caída. Además se estima que un flujo seguro de individuos a través de una puerta de 1 m se encuentra alrededor de los 2,25 personas/ms para poder evacuar de forma segura en 1 min.

Por otro lado, también se puede ver, a partir de estos trabajos que, el tiempo de evacuación ante una situación de emergencia es otro factor determinante en las probabilidades reales que tengan los individuos de sobrevivir. La mayor causa que impide una evacuación y que a su vez, resulta en la mayor proporción de muertes, son que el fuego bloquee la salida y que no haya suficiente tiempo de evacuación [43]. Además, el humo, la falta de luz y el monóxido de carbono no solo reducen la visibilidad, al irritarse los ojos, sino que provocan pérdidas de estabilidad, ansiedad, nervios, incertidumbre o miedo en los individuos que huyen [44–46].

En casos de incendio, las visibilidades van desde 1 m hasta los 14 m, mientras que la densidad de humo, en unidades de extinción, para un escape seguro se encuentran entre $0,5 \text{ m}^{-1}$ y $3,5 \text{ m}^{-1}$ que se traduce a visibilidades entre los 0,85 m y los 6 m [21, 40, 47, 48]. Por otro lado, la pérdida de orientación, del estado de lucidez, inestabilidad o hipoxia son consecuencias comunes en ambientes con humo o concentraciones importantes de gases

CO (ppm)	Tiempo (min)	m (kg)	d (m)
1600	20	4.70 - 5.52	0.60 - 14.5
3200	7.5	9.41 - 11.03	0.30 - 7.24
6400	1.5	18.82 - 22.07	0.15 - 3.62
12800	<1.5	37.65 - 44.14	0.07 - 1.81

Cuadro 1.1: Tiempos hasta la pérdida de conciencia en ambientes con distinta concentración de monóxido de carbono. Los tiempos se indican en la segunda columna, mientras que la tercera indica la cantidad de celulosa en kg requerida para reproducir la misma cantidad de concentración de CO en una habitación de 1000 m³. La última columna corresponde a una aproximación de la visibilidad asumiendo un factor de conversión del humo ϵ entre 0,01 - 0,02 y un coeficiente de extinción por densidad de masa K_m entre 4,4 y 7,6 m²/g. Datos reproducidos de la Ref [21]

tóxicos que suelen ser una causa de muerte subestimada frente a las demás. La inhalación de monóxido de carbono puede traer aparejadas consecuencias neurológicas [46]. Se estima que estas consecuencias pueden ocurrir en lapsos de tiempo de pocos minutos o menos [21]. A modo de ejemplo, en la tabla 1.1 se pueden observar valores de tiempo, en minutos, hasta que ocurre la pérdida de conciencia de un individuo en función de la concentración de CO.

1.2. Objetivos

En esta investigación se estudia cómo la visibilidad afecta la dinámica en una evacuación de emergencia. El objetivo específico es analizar distintos tipos de comportamientos de huida bajo este contexto. Para ello, se limitará a analizar un recinto cuadrado, con una única salida en uno de sus lados. La tesis se organiza del siguiente modo:

- En el Capítulo 2 se sentarán las bases teóricas del modelo de Fuerza Social, utilizado a lo largo de la investigación.
- En el Capítulo 3 presenta los comportamientos estudiados y las condiciones utilizadas para cada una de las simulaciones realizadas.
- En el Capítulo 4 presenta los resultados para individuos que evacúan: realizando

una caminata aleatoria 3.2.1, siguiendo una pared 3.2.2 o bajo las indicaciones de un guía 3.2.3. En todos los casos, se estudió como es el tiempo de evacuación en función de la visibilidad y la ansiedad del individuo. A su vez, se presentan resultados para puerta angosta (0,92 m) y puerta ancha (1,84 m) (Sec. 4.1 y 4.2), un estudio sobre la densidad en la cercanía de una puerta angosta (0,92 m) (Sec. 4.1), y los resultados para tres posiciones distintas de un guía dentro de la habitación 4.3.

- En el Capítulo 5 se realizan las comparaciones entre los distintos comportamientos estudiados.
 - En la Sección 5.1 se comparan los movimientos donde los individuos siguen la pared o son guiados hacia la salida contra una caminata aleatoria.
 - En la Sección 5.2 se comparan evacuaciones en la que los individuos siguen la pared contra aquellas donde se los guía hacia la salida.
 - En la Sección 5.3 se comparan las diferencias de ubicar un guía sobre una pared contra una posición de la habitación centralizada.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Modelo de Fuerza Social (básico)

Esta investigación analizará tres tipos de comportamientos (evacuaciones mediante: caminatas aleatorias, seguimiento de la pared y guiadas por un líder), que los individuos pueden realizar al evacuar, en el contexto del modelo de Fuerza Social. El mismo, establece un marco para simular la dinámica colectiva de peatones auto-impulsados. Estos peatones se representan como agentes circulares de radio r_i que siguen una ecuación de movimiento clásica (Ec. 2.1), que involucra una combinación de fuerzas físicas y psicológicas. El modelo propuesto por Helbing *et al.* [16, 17], introduce tres fuerzas: la “fuerza de deseo”, la “fuerza social” y la “fuerza granular”. La primera corresponde al deseo o motivaciones del individuo por moverse en una dirección determinada. La segunda, representa la tendencia de los individuos por mantener un “espacio personal”. Por último, la “fuerza granular” se relaciona con la fricción entre los individuos que entran en contacto.

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \mathbf{f}_d^{(i)}(t) + \sum_{i \neq j}^N (\mathbf{f}_s^{(ij)} + \mathbf{f}_c^{(ij)}) + \sum_W^{N'} (\mathbf{f}_s^{(iW)} + \mathbf{f}_c^{(iW)}) \quad (2.1)$$

La Ec. (2.1), representa entonces la ecuación de movimiento para un individuo i de masa m_i , donde el subíndice j corresponde a individuos vecinos o paredes. Por otro lado, el término $\mathbf{f}_d^{(i)}(t)$ representa la fuerza de deseo, $\mathbf{f}_s^{(ij)}$ la “fuerza social” de interacción con el entorno y $\mathbf{f}_c^{(ij)}$ la “fuerza de contacto” o fricción física. Los términos que contienen $\mathbf{f}^{(ij)}$ y

$\mathbf{f}^{(iW)}$ representan la interacción entre individuos y con las paredes del recinto, respectivamente. En los mismos se tiene en cuenta tanto la repulsión como el rozamiento.

Fuerza de deseo

La fuerza de deseo representa la motivación de un individuo a dirigirse en una determinada dirección hacia un objetivo a una velocidad de deseo v_d . La misma, varía dependiendo del nivel de ansiedad que la persona posea y será distinta a la velocidad $v_i(t)$ del individuo, en general debido a factores ambientales. Es por eso que la fuerza de deseo será la aceleración requerida para pasar de nuestra velocidad actual ($v_i(t)$) a la “velocidad de deseo” (v_d) y que será proporcional a la diferencia entre ambas según:

$$\mathbf{f}_d^{(i)}(t) = m_i \frac{v_d^{(i)}(t) \hat{\mathbf{e}}_d^{(i)}(t) - \mathbf{v}_i(t)}{\tau} \quad (2.2)$$

donde τ el tiempo de reacción de una persona, y m_i es la masa del individuo i . Este tiempo de reacción se estima a partir de observaciones experimentales y tiene un valor de 0,5 s.

Fuerza social

Por otro lado, la fuerza social \mathbf{f}_s tiene en cuenta los estímulos a los que una persona reacciona. La misma puede ser atractiva en el caso de que esa otra persona sea un familiar o amigo, o repulsiva en caso de que sea un desconocido y ambos desean conservar cierta distancia o “esfera de privacidad” [49]. Para esta investigación nos quedaremos únicamente con el caso repulsivo por el cual si otra persona ingresa en esta “esfera” intentaremos resutaurar la distancia social generando una fuerza repulsiva. Debido a esto se modela la fuerza por medio de una función exponencial decreciente que dependa de la distancia entre individuos dada por:

$$\mathbf{f}_s^{(ij)}(t) = A_i e^{(r_{ij} - d_{ij}(t))/B_i} \hat{\mathbf{n}}_{ij}(t) \quad (2.3)$$

en donde i es el peatón que estamos mirando, j representa peatones, los parámetros experimentales A_i (Intensidad de repulsión social) y B_i (escala característica de distancia para la cual decae la repulsión social) son valores fijos, $r_{ij}=r_i+r_j$ es la suma de los radios de los individuos y d_{ij} la distancia entre los centros de masa de los peatones. $\hat{\mathbf{n}}_{ij}=(n_{ij}^{(1)}, n_{ij}^{(2)})$ es el versor en la dirección $\vec{j}\hat{i}$ (de j hacia i).

Por lo tanto, en una determinada circunstancia, el balance entre la “fuerza social” y el deseo que tenemos de dirigirnos en cierta dirección se puede entender como la distancia para la cual nos vamos a sentir cómodos. Por ejemplo, la distancia que separa a dos personas en una cola de espera va a corresponder al balance entre el deseo por avanzar y la necesidad de mantener un espacio de privacidad. Es a partir de esta distancia que se obtienen experimentalmente los valores de los parámetros A_i y B_i .

Fuerzas de contacto

Por último, la “fuerza de contacto” representa la interacción física entre dos individuos y se manifiesta a través de una compresión y fricción tangencial entre ambos. Para que se genere se necesita que ambos estén en contacto, es decir $d_{ij} < r_{ij}$, y se modela según:

$$\mathbf{f}_c^{(ij)}(t) = Kg(r_{ij} - d_{ij}(t))n_{ij} + \kappa g(r_{ij} - d_{ij}(t))(\Delta\mathbf{v}_{ij}(t) \cdot t_{ij})\hat{t}_{ij} \quad (2.4)$$

donde $\Delta\mathbf{v}_{ij}(t) = v_j - v_i$ es la velocidad relativa entre los peatones i y j , y t_{ij} es el versor tangencial. K y κ son parámetros experimentales (compresión y fricción, respectivamente) y $g(\cdot)$ es una función nula si $d_{ij} > r_{ij}$ o igual a su argumento en caso contrario. Una descripción más detallada de los parámetros se puede encontrar en las Refs. [18, 23].

Los individuos también buscan mantener una cierta distancia con las paredes o con algún obstáculo que se encuentre en su camino. Por lo tanto, la Ec. (2.3) también se aplica en estos casos. Sin embargo, la distancia d_{ij} se reemplaza por d_{iW} que representa la distancia entre la persona y la pared (o el obstáculo) y $\hat{\mathbf{n}}_{ij}$ por $\hat{\mathbf{n}}_{iW}$ (versor perpendicular a la

Cuadro 2.1: Valores de los parámetros utilizados del SFM.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Fuerza social en $d_{ij}=r_{ij}$	A_i	2	kN
Distancia característica	B_i	0.08	m
Masa de los individuos	m_i	70	kg
Radio de los individuos	r_i	0.23	m
Distancia de contacto	r_{ij}	0.46	m
Tiempo de relajación	τ_i	0.5	s
Coefficiente de fricción	κ	3.0×10^5	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
Coefficiente de compresión	K	3640	N/m
Compresión de la pared	K_{nw}	1.2×10^5	N/m

pared). Lo mismo sucede con la fuerza de rozamiento (2.4) cuando las personas están en contacto con las paredes. Allí se debe reemplazar $\hat{\mathbf{t}}_{ij}$ por $\hat{\mathbf{t}}_{iW}$ versor tangencial a la pared y $\Delta \mathbf{v}_{iW}$ por \mathbf{v}_i ya que $\mathbf{v}_W=0$.

$$\mathbf{f}^{(iW)} = A_i e^{(r_i - d_{iW})/B_i} \hat{\mathbf{n}}_{iW} - \kappa g(r_i - d_{iW}) \mathbf{v}_i \cdot \hat{\mathbf{t}}_{iW} \quad (2.5)$$

En la tabla 2.1 se presentan los valores utilizados en la investigación.

2.2. Blocking Clusters

La Ec. 2.1 expresa la dinámica de cada persona dentro de la multitud, cuando comienzan a formarse conjuntos de individuos en contacto, se forman estructuras de transitorias que se definen como “*clusters granulares*”. Se define un *cluster* humano C_g (o *cluster* granular) como aquel conjunto de individuos en contacto que cumplen la siguiente relación (Ref. [18])

$$P_i \in C_g \iff \exists j \in c_g / d_{ij} < (r_i + r_j) \quad (2.6)$$

Siendo P_i la i -ésima persona de una multitud y r_i su radio y d_{ij} la distancia ente los centros de las personas P_i y P_j .

Estos *clusters* son los responsables de bloquear la salida en las cercanías de la puerta ge-

nerando tiempos de evacuación elevados [18, 23]. Al conjunto mínimo de personas que se encuentran en contacto y que bloquean la salida de lado a lado se lo llama *blocking cluster*.

2.3. Algoritmo de integración de Verlet

Se utilizó el algoritmo de Verlet en velocidades para integrar las ecuaciones de movimiento [50]. Las ecuaciones de este método de resolución son:

$$r_i(t + \Delta t) = r_i(t) + v_i(t)\Delta t + \frac{1}{2}a_i(t)\Delta t^2 \quad (2.7)$$

$$v_i(t + \Delta t) = v_i(t) + \frac{a_i(t) + a_i(t + \Delta t)}{2}\Delta t \quad (2.8)$$

El método consiste en primer lugar en, dadas las condiciones iniciales (posiciones y velocidades), calcular las fuerzas \mathbf{f}_d , \mathbf{f}_s y \mathbf{f}_g (y con esto las aceleraciones) sobre cada individuo. En segundo lugar, se hallan las nuevas posiciones, luego las fuerzas (aceleraciones) y finalmente las nuevas velocidades. Este ciclo se repite hasta construir las trayectorias de las partículas. Las condiciones iniciales se presentarán en la sección 3.1.

El algoritmo de Verlet tiene la propiedad de la reversibilidad temporal y además, es simpléctico (conserva el volumen en el espacio de fases). En nuestro caso, la última propiedad es irrelevante debido a que la fuerza de deseo provoca que no se satisfaga el teorema de Liouville. Las características mencionadas conllevan a la preservación de las simetrías de las ecuaciones de Newton y las propiedades físicas de una gran cantidad de sistemas. Por este motivo, el algoritmo de Verlet es ampliamente utilizado, además del hecho de que es fácil de implementar y posee buena estabilidad incluso para grandes pasos temporales.

2.4. Faster is Slower y Faster is Faster

El modelo de fuerza social, logra reproducir importantes fenómenos observados en evacuaciones de emergencia, como el *faster is slower* (Fig. 2.1a) y *faster is faster* (Fig. 2.1b) [28, 33]. El primero corresponde al aumento de los tiempos de la evacuación cuanto más ansiosos (o mayor velocidad de deseo v_d) se encuentren los individuos, mientras que el segundo corresponde a la disminución del tiempo de evacuación cuando aumenta el nivel de ansiedad (o la velocidad de deseo v_d). Para todos los comportamientos estudiados en esta investigación, se observó al menos uno de los fenómenos representados en las Figs. 2.1a y 2.1b.

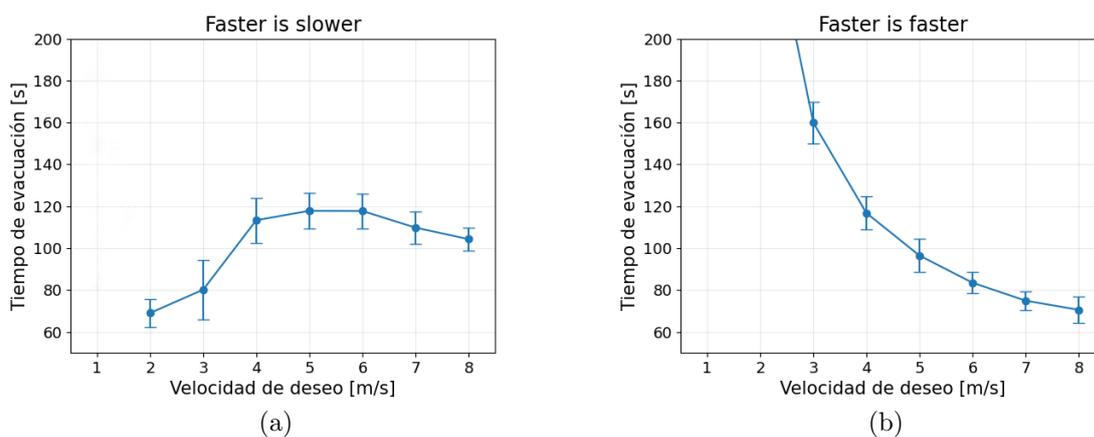


Figura 2.1: Tiempo de evacuación de 200 individuos a través de una puerta angosta (0,92 m) en función de la velocidad de deseo: (a) 6m de visibilidad. (b) Visibilidad de 2m.

Capítulo 3

Simulaciones

La metodología de este estudio consistió en simulaciones computacionales, dentro del contexto del modelo de fuerza social. Para ello, se utilizó el simulador de dinámica molecular *Lammps* que permitió simular y generar videos de las evacuaciones de emergencia. Se implementaron además tres módulos en *C++*, con el fin de mejorar las capacidades de *Lammps* y poder simular los comportamientos de seguimiento de pared y evacuación guiada. El programa permite variar tanto el tamaño de la puerta, de la habitación o de los individuos, así también como el rango de visión, la velocidad de deseo de cada uno.

En primera instancia, se replicaron las condiciones de evacuación para visibilidades de 2 m, 4 m y 6 m estudiadas en la Ref. [21]. A partir de esto se ampliaron la cantidad de escenarios posibles a estudiar y, considerando que las personas siempre se mueven de manera individual, se analizaron los siguientes comportamientos durante una evacuación de emergencia:

- **Caminata Aleatoria:** Los individuos se mueven en la habitación eligiendo la dirección de movimiento de forma aleatoria y manteniendo el módulo de su velocidad de deseo (v_d) constante. En la Sección 3.2.1 se encuentran los detalles de este escenario.
- **Seguimiento de la pared:** Los individuos realizan los mismos movimientos que en el escenario anterior hasta que encuentran una pared. En ese caso, intentan evacuar siguiendola como estrategia de huída. En la Sección 3.2.2 se detallan las condiciones de este escenario.

- **Comportamiento guiado:** Para este escenario se agregó una persona fija (o líder) en algún lugar de la habitación que señala la salida. Los individuos siguen la misma estrategia inicial hasta encontrarlo. En la Sección 3.2.3 se detallan las condiciones bajo las cuales se simuló este escenario.

3.1. Condiciones de la simulación

Geometría del recinto de simulación

A lo largo de toda la investigación se consideró una habitación cuadrada de 20 m x 20 m con una única salida, ubicada en el centro de uno de sus lados (ver Fig. 3.1). Se analizaron los casos en los que la puerta de salida es “angosta” (0,92 m) y “ancha” (1,84 m). La primera permite la salida de dos personas de manera simultánea mientras que la segunda permite cuatro.

Condiciones iniciales

Cada simulación comenzó con una configuración inicial de 200 individuos, de 0,46 m de diámetro, distribuidos aleatoriamente y finalizó luego de 1000 s, o bien, cuando quedaban 40 personas dentro de la habitación, lo que se cumpla primero. Para todos los escenarios se realizaron 50 evacuaciones y se registraron los valores de posición y velocidad de cada individuo, además de tomar los promedios estadísticos de los observables de interés. En la Fig. 3.1 se puede ver una imagen del estado inicial de la simulación.

Visibilidad

La visibilidad se modeló por medio de una distancia de visión fija, que fue la misma para todos los individuos. Esto significa que las paredes, el líder, o la salida sólo se perciben si se encuentra dentro de esa distancia. Las visibilidades exploradas variarán entre 2 m y 10 m dependiendo la simulación realizada. Se eligieron de esta forma con el objetivo de estudiar el mayor rango posible de comportamientos individuales. Se verificó que para visibilidades mayores a 10 m los comportamientos de los individuos no varían, esto se

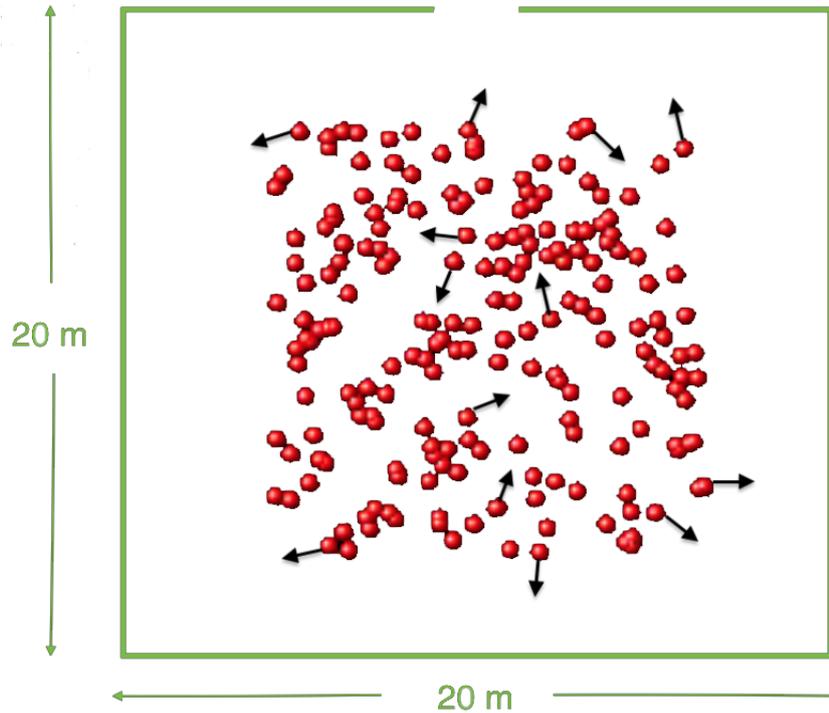


Figura 3.1: Estado inicial de la simulación de 200 individuos en un recinto de 20 m x 20 m y una sola puerta de ancho 0,92 m. Las flechas marcan la dirección de movimiento de distintos individuos.

debe a la combinación entre la ubicación inicial de los mismos y las dimensiones del recinto.

El módulo de la velocidad de deseo fue el mismo para todos los individuos, ya que se asume un único estado de ansiedad para toda la multitud. Se exploraron cambios en la misma desde 2 m/s (estado “relajado”) hasta 8 m/s (estado de altísima ansiedad).

La dirección de la velocidad de deseo, en cambio, depende de que observa el individuo dentro de su campo visual. En el caso de ver la salida, la dirección apuntará directamente hacia ella, mientras que si no está visible adopta diferentes comportamientos (ver Sección 3.2). Se asumió que los individuos actualizan la dirección hacia donde desean dirigirse cada t_d segundos. Durante la investigación sólo se consideraron dos valores para este tiempo, $t_d = 2s$ y $t_d = 10s$. Con ello se buscó representar individuos con distintos rasgos de personalidad: a aquellos con un tiempo mas bajo se los consideró como “individuos indecisos” ($t_d = 2s$), mientras que aquellos cuyo valor de t_d era elevado se los denominó “individuos obstinados” ($t_d = 10s$).

3.2. Tipos de comportamientos estudiados

3.2.1. Caminata aleatoria

Bajo este comportamiento, la persona mantiene una dirección de deseo aleatoria durante un tiempo t_d . Pasado ese tiempo, y asumiendo que la puerta no entró en su radio de visión en ningún momento, la persona elige otra dirección de manera aleatoria. En el caso de que la puerta entre en el rango de visión del individuo, éste modifica su comportamiento y se dirige directamente hacia ella.

3.2.2. Seguimiento de la pared

Los individuos que siguen este comportamiento se mueven de manera similar que aquellos que realizan una caminata aleatoria, hasta el instante en que ven una pared o la puerta salida. En el primer caso, su velocidad de deseo cambia, siguiendo la dirección de la pared en sentido anti-horario (ver Fig. 3.1). En el segundo caso, se dirige directamente hacia la salida.

3.2.3. Presencia de un guía

Un líder es un individuo que se encuentra quieto durante toda la simulación en algún lugar de la habitación señalando la salida. Todas aquellas personas que lo vean, cambiarán la dirección de su velocidad de deseo para apuntar directamente hacia la salida, sin importar la visibilidad.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de la evacuación de 200 individuos bajo las condiciones mencionadas en la sección 3.1 y los tres comportamientos detallados en las Secciones 3.2.1, 3.2.2 y 3.2.3. Los resultados se organizan del siguiente modo:

- En la Sec. 4.1, se analizan los resultados para una caminata aleatoria. En la misma se exploran dos tamaños de puerta distintos (angosta y ancha)
- En la Sec. 4.2, se presentan los resultados para individuos que siguen la pared. Se analizaron los casos de puerta angosta y ancha.
- Por último, en la Sec. 4.3 se encuentran los resultados para tres posiciones distintas del líder, con el objetivo de conocer el impacto que este tiene sobre la evacuación.

Es importante notar que los tiempos de evacuación obtenidos en las simulaciones corresponden a promedios estadísticos sobre 50 procesos de evacuación. Estos deben compararse con los tiempos promedios dados en la Tabla 1.1 para una evaluación del riesgo de vida en cada escenario.

4.1. Caminata aleatoria

En esta sección se analizó el tiempo que llevó evacuar de la habitación al 80% de los individuos bajo distintas condiciones de visibilidad y niveles de ansiedad (v_d o velocidad

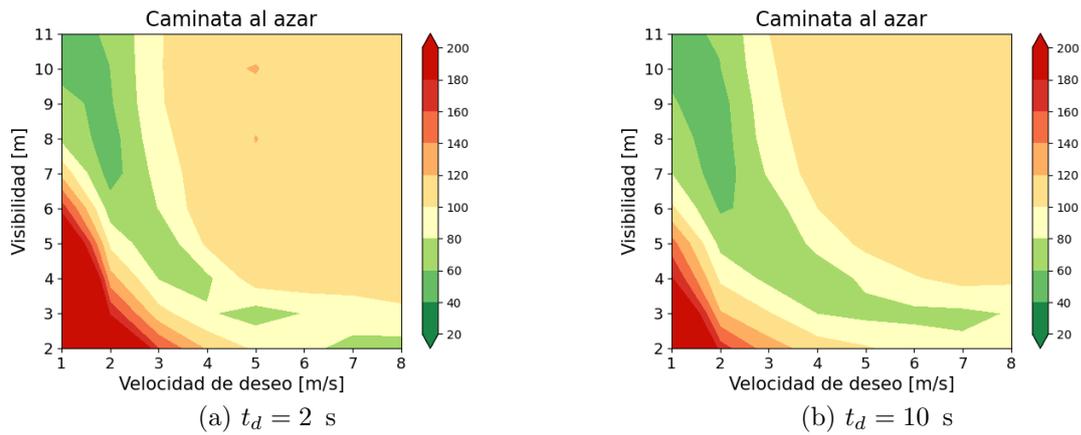


Figura 4.1: Curvas de nivel del tiempo de evacuación para un comportamiento de caminata aleatoria con $t_d = 2$ s (individuos indecisos) y $t_d = 10$ s (individuos obstinados) y una puerta angosta de dos individuos. t_d es el tiempo que tardan los individuos en actualizar su velocidad de deseo. La escala de color indica los tiempos de evacuación en segundos para distintas combinaciones de velocidades de deseo y visibilidades.

de deseo) para individuos indecisos y obstinados (ver Sección 3.1). Además, se estudió el efecto del tamaño de la puerta en los tiempos de evacuación.

4.1.1. Puerta angosta

En las Figs. 4.1a y 4.1b se pueden observar dos curvas de nivel para distintos valores de visibilidad y velocidad de deseo (ver leyenda para más detalle).

En una primera inspección, se observa que para valores de visibilidad baja, los individuos cuya ansiedad (o velocidad de deseo) es baja deambulan por la habitación durante un tiempo largo sin encontrar la salida. En la medida que su ansiedad se incrementa (para la misma visibilidad), los individuos recorren mayores distancias, de manera que exploran más rápidamente la habitación. Esto aumenta la probabilidad de encontrar la puerta en un corto lapso de tiempo. Este régimen es de tipo *faster is faster* ya que cuanto mayor sea su velocidad de deseo, más rápido evacúan.

La inspección de las animaciones para visibilidades elevadas (7 m en adelante) muestra que los individuos evacúan en lapsos de tiempo similares, independientemente del valor de

t_d . Esto se debe a que los individuos comienzan la simulación distribuidos aleatoriamente en la habitación, pero como la visibilidad es alta, muchos de ellos visualizan la salida rápidamente sin necesidad de deambular por la misma.

Sin embargo, la *performance* de la evacuación para visibilidades elevadas empeora a medida que la velocidad de deseo aumenta (mayor nivel de ansiedad). Esto es consecuencia de la congestión que se forma en torno a la puerta de salida. Es un fenómeno muy estudiado en la literatura y se conoce como *faster is slower* (Ref. [17]). Cuanto más se esfuerzan los individuos por salir, más lento lo hacen. Esto se debe a la presencia de *blocking clusters* en la zona inmediata a la puerta (Ref. [18, 23, 25, 26]).

Con el fin de observar la congestión en la cercanía de la puerta, se tomó un área rectangular de 1,69 m² (equivalente a 2 x 4 individuos, Fig. 4.2) y se contabilizó la cantidad de individuos en ese área a lo largo de la evacuación. Si bien el estudio de la congestión se realizó para individuos indecisos ($t_d = 2$ s) y obstinados ($t_d = 10$ s), ambos muestran resultados similares, por lo que solamente se grafican los correspondientes a individuos indecisos.

La Fig. 4.3 muestra la evolución temporal para dos visibilidades distintas (2 m y 6 m), en el caso de individuos indecisos en estados de alta ansiedad (6 m/s). Es inmediato observar que el escenario de 6 m de visibilidad produce una mayor congestión que el de 2 m. Ya desde el primer momento de la evacuación, se observa una densidad de personas/m² elevada en la cercanía de la puerta. Esto apoya la idea de que, a visibilidades y velocidades de deseo elevadas, se formen *blocking clusters* en la salida y se genere el fenómeno de *faster is slower*.

Por otro lado, la Fig. 4.4 muestra la comparación entre la densidad de personas por m² en el área estudiada y los tiempos de evacuación para distintas combinaciones de visibilidad y velocidad de deseo. Se observa que los tiempos óptimos de evacuación ocurren para escenarios con densidades entre 2 y 4 personas/m². Si la densidad es muy alta (mayor a 5 personas/m²) se generan bloqueos que terminan demorando la evacuación, mientras

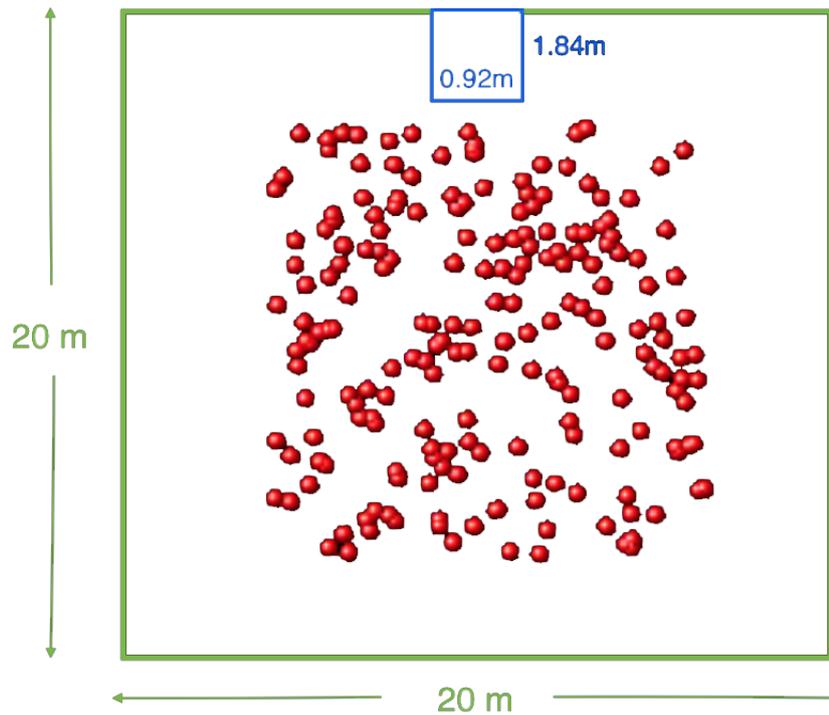


Figura 4.2: Esquema del área elegida para observar la acumulación de gente en zonas cercanas a la puerta. Las dimensiones de la misma fueron de 0,92m x 1,84m que equivale a un ancho de 2x4 individuos.

que si la densidad es baja (menor a 2 personas/m²) se corre el riesgo de que no haya nadie evacuando.

En el Apéndice C se realizó un estudio complementario de este fenómeno por medio de las curvas de descarga. Los resultados allí presentados confirman estas conclusiones.

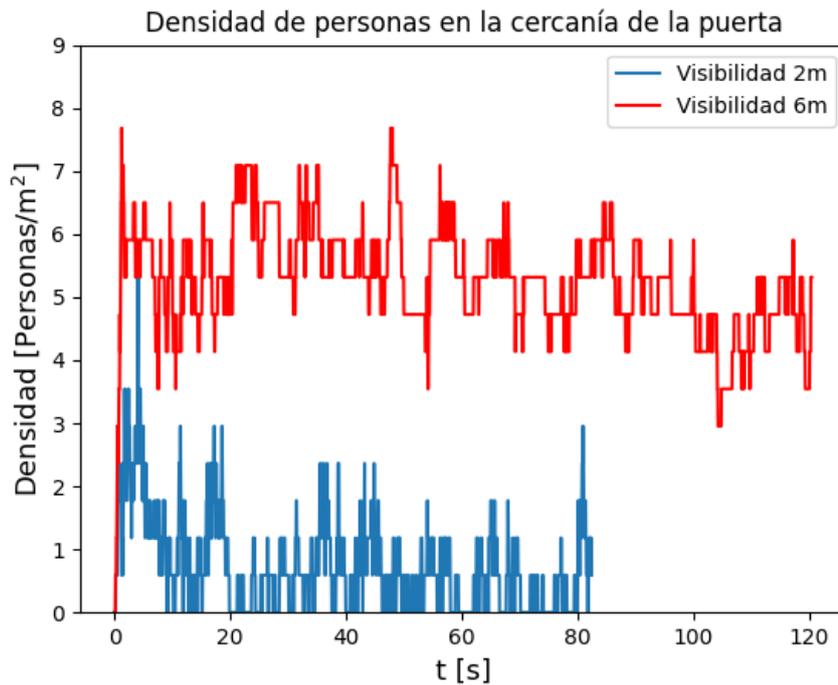


Figura 4.3: Variación en función del tiempo de la densidad de individuos que se encuentran dentro del área designada. En ambos casos la velocidad de deseo estudiada es de 6 m/s y se consideraron individuos indecisos ($t_d = 2$ s). (a) Visibilidad de 2m. (b) Visibilidad de 6m.

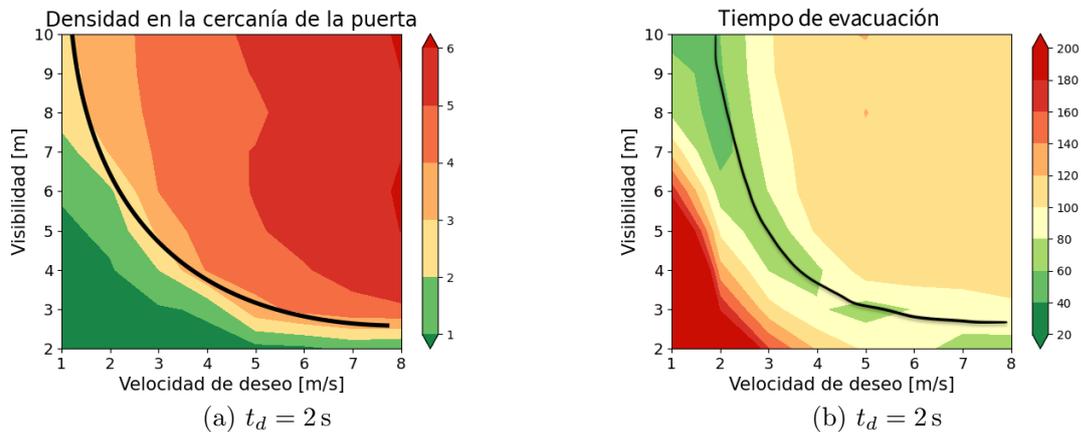


Figura 4.4: Ambos gráficos se construyeron a partir de evacuaciones de individuos indecisos ($t_d = 2$ s) y una puerta angosta de dos individuos. (a) Mapa de densidad promedio en la cercanía de la puerta para. El área alrededor de la puerta es de $1,69 \text{ m}^2$ y la escala de color indica la densidad promedio de personas (en personas/ m^2) que se encuentran dentro del área a lo largo de la simulación. (b) Curva de nivel del tiempo de evacuación para un comportamiento de caminata aleatoria. La escala de color indica los tiempos de evacuación en segundos para distintas combinaciones de velocidades de deseo y visibilidades. La línea negra muestra la correlación entre los tiempos óptimos de escape y su correspondiente densidad

4.1.2. Puerta ancha

La Fig. 4.5 muestra los tiempos de evacuación para todas las visibilidades y niveles de ansiedad explorados. A diferencia de lo observado para la puerta angosta (ver Fig. 4.1), aquí no se presenta el fenómeno de *faster is slower* para ningún valor de visibilidad explorado. Esto es esperable, ya que estudios previos que vinculan *blocking clusters* y tiempos de evacuación para puertas anchas señalan que la probabilidad y estabilidad de los mismos disminuye a medida que aumenta el tamaño de la puerta [18]. Más detalles sobre estas discusiones se encuentran en las Refs. [20, 23, 25].

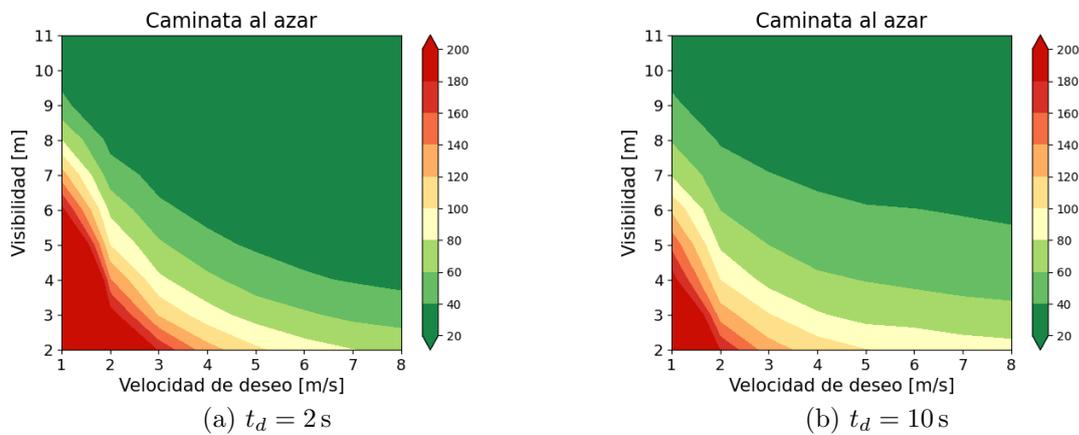


Figura 4.5: Curvas de nivel del tiempo de evacuación para un comportamiento de caminata aleatoria con individuos indecisos y obstinados. El tamaño de la puerta es tal que pueden evacuar cuatro individuos simultáneamente. La escala de color indica los tiempos de evacuación en segundos para distintas combinaciones de velocidades de deseo y visibilidades.

Las similitudes y diferencias cualitativas entre las Figs. 4.1 y 4.5 son las siguientes:

- Para visibilidades menores a 5 m y velocidades de deseo menores a 3 m/s se obtienen evacuaciones similares, independientemente de que los individuos sean indecisos u obstinados. Esto se debe a que el tiempo que emplean en su búsqueda de la puerta es mayor al que puedan llegar a provocar congestiones en la salida.
- Para visibilidades de 5 m o mayores, y velocidades de deseo superiores a 3 m/s, los comportamientos difieren significativamente. En el caso de la puerta ancha no

se observa el fenómeno de *faster is slower* (para el nivel de resolución de la figura). Esto se debe a que la probabilidad de que se forme un *blocking clusters* y la estabilidad del mismo disminuyen a medida que aumenta el tamaño de la puerta [18].

Conclusiones preliminares - Caminata aleatoria

La conclusión preliminar para este comportamiento se puede dividir en dos partes. La primera es sobre la comparación entre individuos indecisos u obstinados y su comportamiento frente a distintos regímenes de velocidad de deseo y visibilidad para distintos tamaños de puerta. La segunda, será sobre la congestión en la cercanía de la puerta.

En primer lugar y para un tamaño de puerta fija, las curvas de nivel de las Figs. 4.1 y 4.5 muestran que ambos comportamientos son cualitativamente similares entre sí. Esto significa que los individuos, ya sean indecisos u obstinados, muestran una *performance* de evacuación similar para distintos rangos de visibilidad y velocidad de deseo.

Por otro lado, las evacuaciones con puertas angostas presentan fenómenos de tipo *faster is slower* para visibilidades mayores a 4 m y tipo *faster is faster* para visibilidades menores a 4 m (dentro de los límites explorados, ver Fig. 4.1). Por otro lado, para puertas anchas únicamente observamos *faster is faster* debido a la baja probabilidad de formación de *blocking clusters*.

Por último y únicamente para puerta angosta, el cambio entre un régimen de *faster is slower* a otro *faster is faster* no depende del tiempo que tardan los individuos en cambiar de dirección sino del grado de congestión que se forme en torno a la salida. Esto dependerá del nivel de visibilidad del ambiente, que generará más o menos congestión según lo observado en la Fig. 4.4a, donde los escenarios óptimos de evacuación se dan cuando la densidad de personas en un área cercana a la puerta se encuentra entre 2 y 4 personas/m² (línea sólida de la Fig. 4.4).

4.2. Evacuación con seguimiento de la pared

El segundo tipo de comportamiento estudiado en esta investigación corresponde a individuos que caminan aleatoriamente, pero cambian su comportamiento al ver una pared. Únicamente se consideró el caso en el que los individuos siguen la pared en un único sentido (anti-horario) hasta hallar la salida. En el modelo SFM, esto significa que la dirección de su velocidad de deseo es paralela a la pared.

Se separó el análisis en los casos de puerta angosta y ancha. En cada uno de esos casos, se consideraron individuos indecisos u obstinados (ver Sec. 3.1) y la simulación finalizó cuando el 80% de los individuos abandona el recinto.

4.2.1. Puerta angosta

En la Fig. 4.6 se muestra la comparación entre evacuaciones de individuos indecisos para los dos tipos de comportamientos planteados hasta el momento. En la Fig. 4.6a vemos una evacuación donde los individuos siguen una pared, mientras que en la Fig. 4.6b podemos ver una evacuación con caminata aleatoria. La evacuación con individuos obstinados que siguen la pared no se muestra ya que presenta comportamientos similares a aquella realizada por individuos indecisos.

Si bien las curvas de nivel de los tiempos de evacuación pueden resultar similares a las de una caminata aleatoria, se nota una mejora de *performance* de alrededor de un 20% cuando la visibilidad y la velocidad de deseo son bajas.

Se observa también que el fenómeno de *faster is slower* se encuentra presente prácticamente para todos los rangos de visión. La razón yace en que eventualmente todos los individuos que encuentran la pared terminarán en la salida y cuando las velocidades de deseo son altas se formarán *blocking clusters* en las áreas cercanas a la salida.

Sin embargo, para visibilidades menores a 3m, los individuos deben pasar muy cerca de la

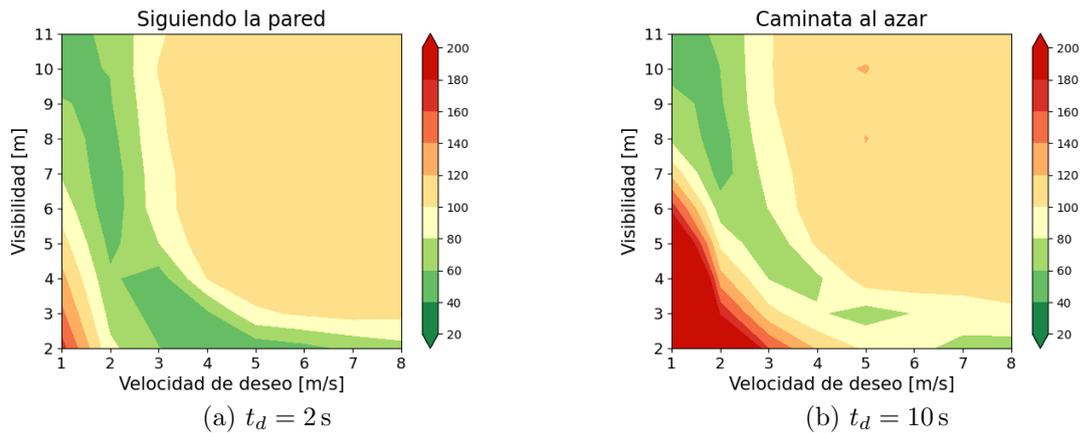


Figura 4.6: Curvas de nivel del tiempo de evacuación para individuos indecisos con un comportamiento donde (a) los individuos evacúan siguiendo la pared , (b) los individuos evacúan realizando una caminata aleatoria. La escala de color indica los tiempos de evacuación en segundos para distintas combinaciones de velocidades de deseo y visibilidades. Ambas figuras fueron simuladas para una habitación con puerta angosta ($0,92\text{ m}$).

puerta para poder evacuar por lo que deambular hasta encontrar una pared resulta una estrategia significativamente mejor. Las posibilidades de encontrar una pared son más altas que encontrar la puerta y es por eso que aún en el caso donde tengan que recorrer todo el perímetro de la habitación, una vez que encuentran una pared los individuos se aseguran llegar a la puerta. Debido a esto, la evacuación para visibilidades y velocidades de deseo (v_d) bajas mejoran ampliamente respecto a la caminata aleatoria. Por otro lado este tipo de comportamiento, si bien puede resultar en evacuaciones que para ciertos individuos tomen más tiempo, genera una menor concentración de personas en la cercanía de la puerta evitando la formación de *blocking clusters* y optimizando la evacuación.

4.2.2. Puerta ancha

Para el estudio con puerta ancha ($1,84\text{ m}$) se obtuvo la Fig. 4.7, donde al igual que para la Fig. 4.5, no se observa el fenómeno de *faster is slower* y los tiempos de evacuación mejoran respecto al comportamiento libre debido a la falta de formación de *blocking clusters*, sobre todo a visibilidades bajas.

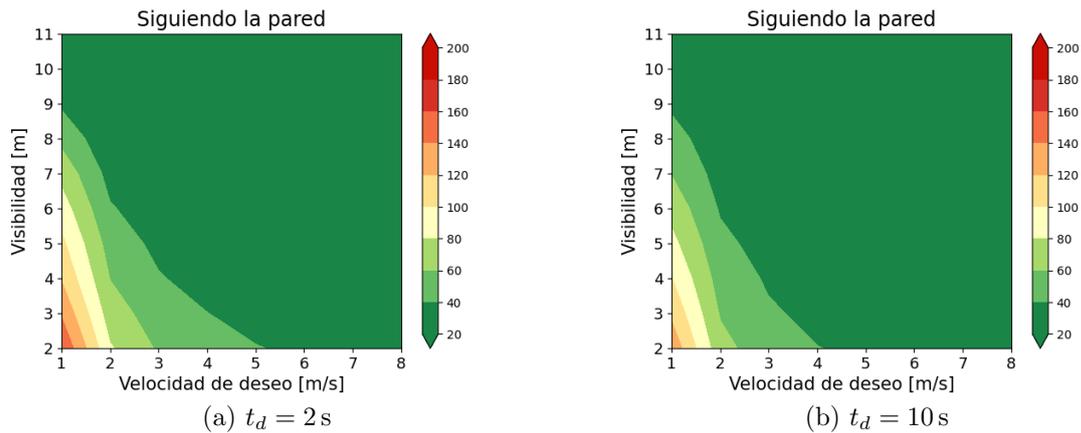


Figura 4.7: Curvas de nivel del tiempo de evacuación para un comportamiento donde los individuos, indecisos u obstinados, evacúan siguiendo la pared. La escala de color indica los tiempos de evacuación para distintas combinaciones de velocidades de deseo y visibilidades. Ambas figuras fueron simuladas para una habitación con puerta ancha (1,84 m).

En resumen, para un comportamiento donde todos los individuos siguen a la pared en el mismo sentido, no se observó que los períodos de actualización de la dirección t_d afecten significativamente la evacuación como pasaba con una caminata aleatoria. Sin embargo, frente a visibilidades bajas parecería ser beneficioso elegir una dirección arbitraria hasta encontrarse con una pared y seguirla a deambular indefinidamente hasta encontrar la puerta.

4.3. Comportamiento guiado

En esta sección se presentan los resultados para el último tipo de comportamiento estudiado, el cual se dividió en función de la posición del “líder”. Se realizaron estudios para tres posiciones distintas, donde los individuos comienzan la simulación con una caminata aleatoria (Ver Sección 4.1) hasta que dentro de su rango de visión aparece un líder el cual le informa la ubicación de la salida. A partir de ese momento el individuo comienza a dirigirse hacia la salida haciendo caso omiso al período de cambio de dirección t_d .

Las posiciones elegidas para ubicar al líder fueron: el centro de la habitación, la pared opuesta a la puerta, y una de las paredes laterales a la salida. Por otro lado, y en base a

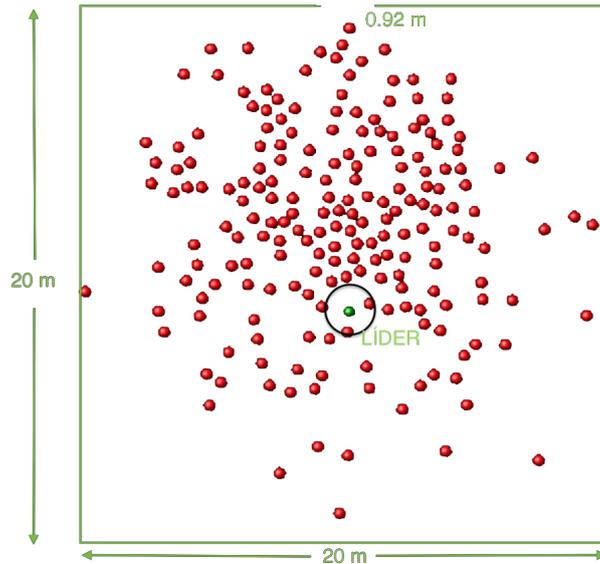


Figura 4.8: Ejemplo de una simulación con comportamiento guiado. Habitación de 20m x 20 m y una puerta de 0,92 m. En verde se puede ver la posición del líder, que se mantiene fija durante toda la simulación.

los resultados previos, se tomaron en cuenta sólo tres valores representativos de visibilidad, (2 m, 5 m y 10 m) para luego compararlos contra sus análogos en la situación de caminata aleatoria y seguimiento de la pared buscando observar el impacto que el líder genera.

4.3.1. Presencia de un líder en el centro de la habitación

Primero se ubicó al líder en el centro de la habitación, como se puede ver en la Fig. 4.8 y se graficaron los tiempos de evacuación en función de la velocidad de deseo para individuos indecisos y obstinados.

En la Fig. 4.9 se observa la comparación entre distintos valores de actualización de la dirección (t_d) donde se destacan tres comportamientos. El primero es la falta de injerencia que tiene el valor de t_d en los tiempos de evacuación, el segundo la similitud entre evacuaciones con visibilidad de 5 m y 10 m, y por último el corrimiento del mínimo tiempo de evacuación al modificar la visibilidad.

Estos comportamientos resultan diferentes respecto a lo reportado en las secciones 4.1 y

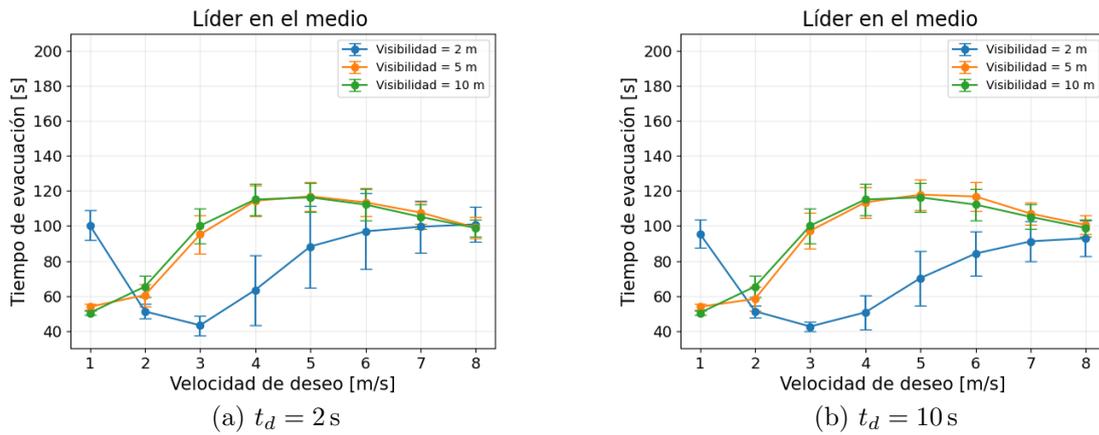


Figura 4.9: Tiempo de evacuación medio en función de la velocidad de deseo para visibilidades de 2m, 5m y 10m y con individuos indecisos ($t_d = 2s$) u obstinados ($t_d = 10s$). Las barras verticales corresponden a una desviación estándar.

4.2. Se considera que se deben a la posición del líder y el impacto que éste tiene sobre el comportamiento de los individuos debido a la distribución inicial de la simulación (ver Sec. 3.1). Bajo estas condiciones, lo que sucede es que el líder da información sobre la ubicación de la puerta, logrando que la mayoría de los individuos evacúen de manera similar a como si vieran la puerta, a pesar de que su visibilidad no lo permita. Esto genera que el efecto de *faster is slower* se corra hacia velocidades de deseo todavía más bajas.

4.3.2. Presencia de un líder en una pared perpendicular a la puerta

En segundo lugar, se estudió la acción de un líder ubicado sobre una de las paredes de la habitación que no contienen a la puerta, como se puede ver en las Figs. 4.10a y 4.10b. Para ambos no se observan diferencias significativas en los tiempos de evacuación (Fig. 4.11). En ambos casos, y como sucedía con un líder en posición central, se comprobó que se pueden considerar como similares a las evacuaciones para individuos indecisos u obstinados, como se puede ver en la Fig. 4.12. En el siguiente Capítulo (5), se compararán todos los comportamientos estudiados.

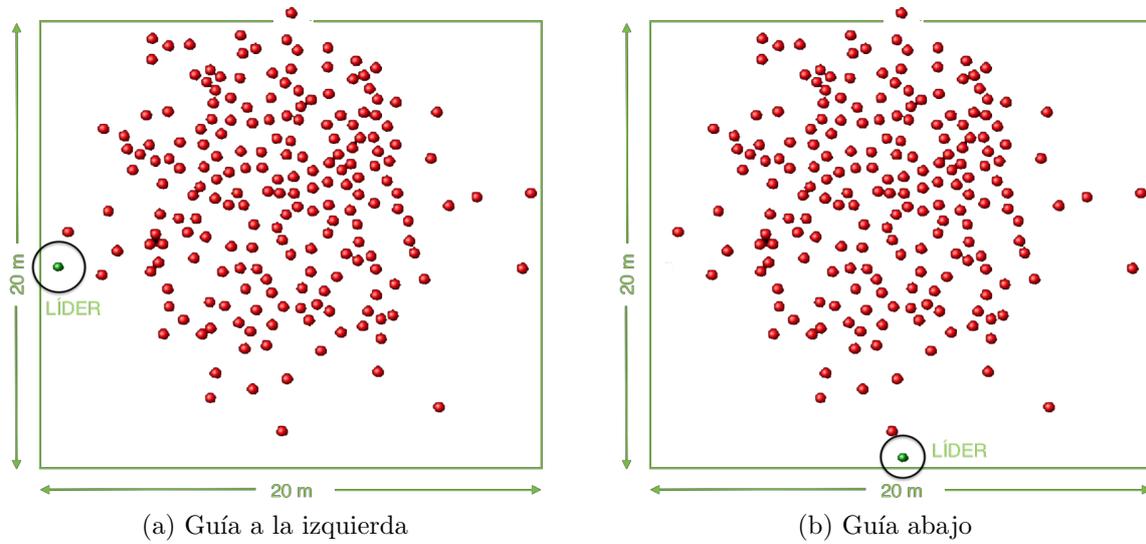


Figura 4.10: Ejemplo de una simulación de 200 individuos en una habitación de 20m x 20m y una salida con un ancho de 0,92m. Los individuos que buscan evacuar se muestran en rojo mientras que en verde se encuentra el líder

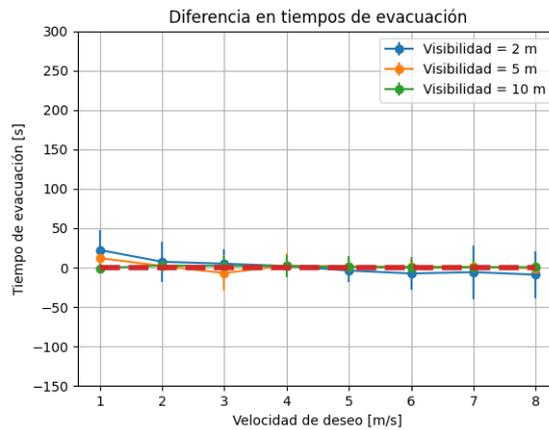


Figura 4.11: Diferencia entre tiempos de evacuación para los comportamientos guiados por personas en paredes que no contienen la salida. La línea punteada (roja) muestra la referencia para la cual ambas evacuaciones son iguales. Los valores positivos implican cuanto tiempo de más lleva evacuar con un líder en la pared opuesta a la salida, mientras que los negativos cuanto tiempo de más lleva evacuar con un líder en una pared perpendicular a la de la salida. El período de actualización de la dirección de la velocidad de deseo es de $t_d = 2$ s. Las barras verticales representan la desviación típica de los datos.

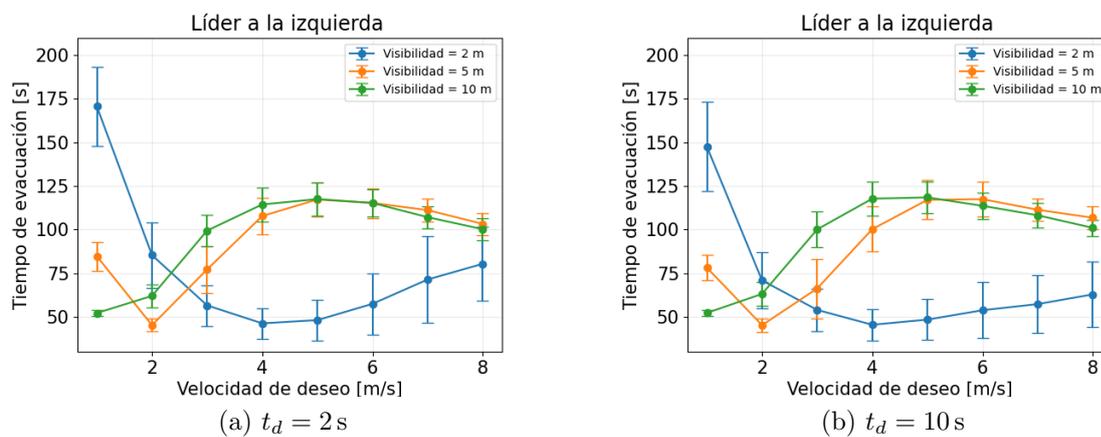


Figura 4.12: Tiempo de escape medio en función de la velocidad de deseo con un líder ubicado en una pared perpendicular a la puerta y para visibilidades de 2m, 5m y 10m. Se consideraron individuos (a) indecisos $t_d = 2$ s y (b) obstinados $t_d = 10$ s. Las barras verticales representan la desviación típica de los datos.

Capítulo 5

Comparación respecto de comportamientos guiados

En este capítulo se presentan las comparaciones de los comportamientos estudiados respecto de los comportamientos guiados, con el fin de encontrar el mejor proceso de evacuación, bajo la siguiente estructura:

- Comparaciones para evacuación con caminata aleatoria (Sec. 5.1)
 - Caminata aleatoria vs Líder centrado
- Comparaciones para evacuación siguiendo la pared (Sec. 5.2)
 - Seguimiento de la pared vs Líder centrado
- Comparaciones para evacuación guiada (Sec. 5.3)
 - Líder centrado vs Líder contra una pared

5.1. Comparaciones para evacuación con caminata aleatoria

Comenzando por el comportamiento de caminata aleatoria (ver Sec. 4.1), en esta Sección se la comparará con individuos indecisos únicamente y contra una evacuación guiada desde el centro. Para la comparación contra una evacuación guiada desde una pared y la

comparación con individuos obstinados, referirse al Apéndice A.

5.1.1. Caminata aleatoria vs Líder centrado

En esta sección se comparan los tiempos de evacuación y densidades en la cercanía de la puerta para los comportamientos de caminata aleatoria y evacuaciones guiadas por un líder desde el centro de la habitación.

En la Fig. 5.1, se muestra la diferencia entre los tiempos de evacuación con y sin líder según la ecuación:

$$Dif = t_{ca} - t_g \quad (5.1)$$

donde Dif es la diferencia entre los tiempos de cada tipo de comportamiento al evacuar, t_{ca} es el tiempo que toma evacuar realizando una caminata aleatoria sin líder y t_g es el tiempo que toma evacuar con un líder. De esta manera, valores cercanos a cero indican que ambas evacuaciones tomaron el mismo tiempo, mientras que valores positivos indican el tiempo de exceso que llevó evacuar realizando una caminata aleatoria (sin líder).

A partir de la Fig. 5.1, podemos notar inmediatamente cómo la presencia de un líder impacta positivamente en las evacuaciones para visibilidades bajas y medias, manteniendo tiempos similares para visibilidades altas. Esto sucede tanto para individuos indecisos como obstinados, por lo que los siguientes gráficos y análisis se realizarán únicamente con individuos indecisos (para revisar el mismo análisis con individuos obstinados ver Apéndice A). En particular se observa, para visibilidad de 2 m, que la presencia de un líder disminuye notablemente los tiempos de evacuación para velocidades de deseo menores a 5 m/s y los aumenta para velocidades de deseo (v_d) mayores. Los casos en los que la evacuación guiada empeora la evacuación son poco influyentes frente a los beneficios que trae cuando mejora la evacuación.

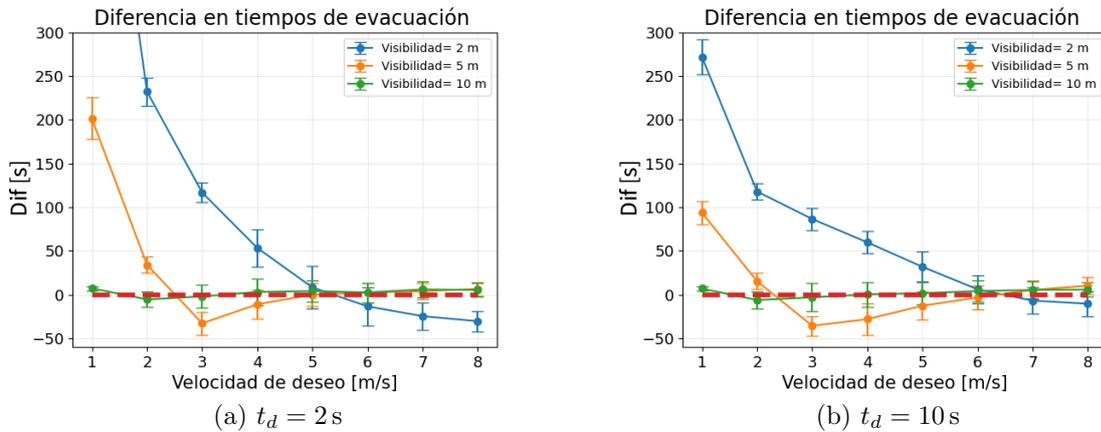


Figura 5.1: Diferencia entre tiempos de evacuación para los comportamientos de caminata aleatoria y con líder en el centro de la habitación para individuos (a) indecisos y (b) obstinados. La línea punteada (roja) muestra la referencia donde ambas evacuaciones son iguales, los valores positivos implican cuanto tiempo de más lleva evacuar realizando una caminata aleatoria, mientras que los valores negativos implican que la evacuación guiada desde el centro demora más. Las barras verticales representan la desviación típica de los datos.

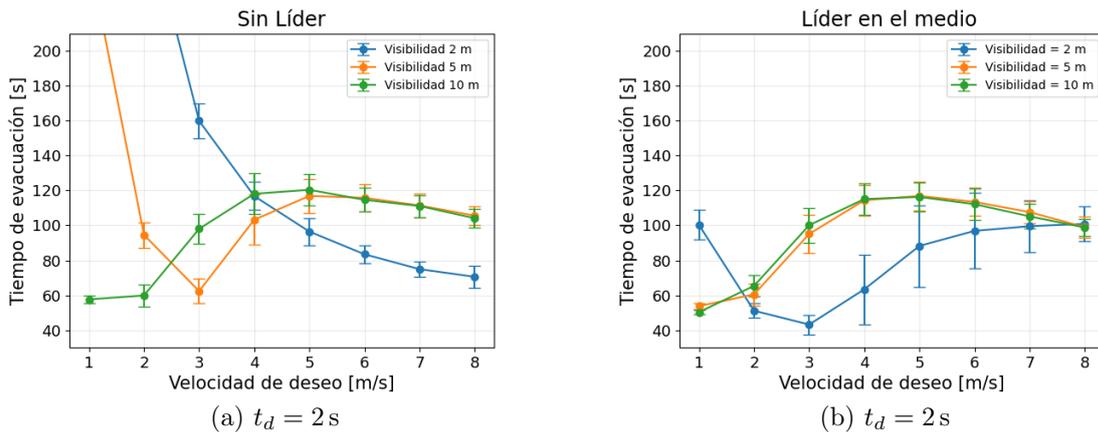


Figura 5.2: Tiempo de escape medio en función de la velocidad de deseo para visibilidades de 2m, 5m y 10m. Se comparan (a) la evacuación cuando se realiza una caminata aleatoria sin líder, contra (b) una caminata aleatoria con un líder en el centro de la habitación. En ambos casos se consideraron individuos indecisos ($t_d = 2\text{ s}$). Las barras verticales representan la desviación típica de los datos.

Con el fin de entender el cambio de eficacia de los comportamientos a velocidades de entre 5 m/s y 6 m/s, se graficaron en la Fig. 5.2 los tiempos de evacuación en función de la velocidad de deseo para individuos indecisos.

Para visibilidad baja, se evidencia que el cambio mencionado se produce cuando en la evacuación guiada, que se rige por el fenómeno de *“faster is slower”*, aparecen los efectos de los *“blocking clusters”* debido a los altos niveles de ansiedad. Sumado a esto, la evacuación realizando una caminata aleatoria presenta el fenómeno de *“faster is faster”*, por lo que para velocidades de deseo altas se terminan invirtiendo los roles y esta última estrategia de evacuación termina en una evacuación más eficiente. Por otro lado, para visibilidades medias (5 m) se tiene que bajo la presencia de un líder es imposible distinguirla de una evacuación con visibilidades altas.

Tanto esta última observación como la aparición del fenómeno de *“faster is slower”* para visibilidades bajas, que no aparecía bajo un comportamiento de caminata aleatoria (Fig. 4.1), se deben principalmente a la ubicación del líder y la distancia a la que se encuentran los individuos al comienzo de la simulación.

En la Fig. 5.3 se pueden comparar las densidades alrededor de la puerta para un comportamiento de caminata aleatoria contra un comportamiento guiado por un líder desde el centro del recinto.

Analizando esta figura en conjunto con la Fig. 5.2 se observan los roles que cumple la congestión en la cercanía de la puerta. Tener baja densidad no siempre asegura una evacuación más rápida ya que si la combinamos con una velocidad de deseo (v_d) baja y visibilidad baja, tendremos a los individuos deambulando por la habitación durante períodos de tiempo elevados. En este caso agregar un líder para ayudar la evacuación, genera mejoras considerables porque conduce a los individuos a la puerta, evitando congestionarla. Sin embargo, se debe cuidar de no sobre-ocupar la zona cercana a la puerta ya que, de lo contrario se generarían embotellamientos.

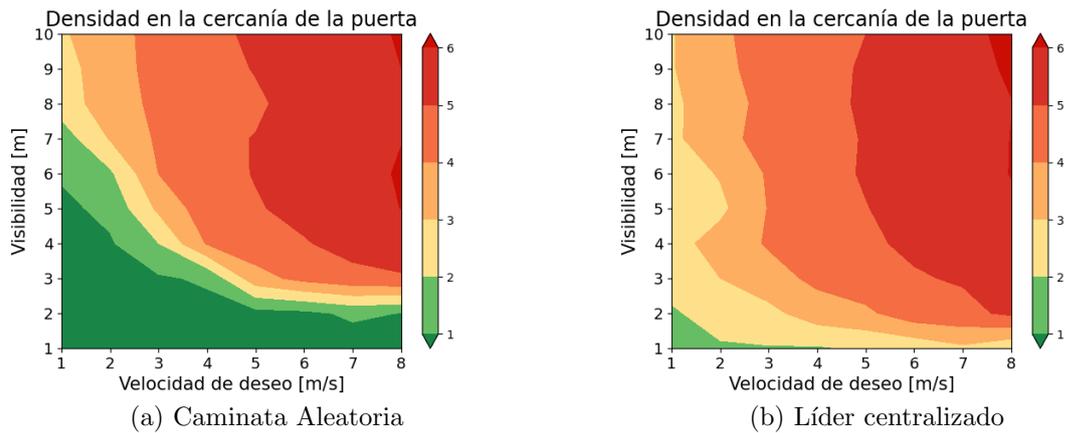


Figura 5.3: Mapa de densidad en la cercanía de la puerta para distintos valores de visibilidad y velocidades de deseo (v_d). Se muestran comportamientos de (a) caminata aleatoria y (b) líder centralizado. El área alrededor de la puerta es de $1,69m^2$ y se consideraron individuos indecisos $t_d = 2$ s

Según las simulaciones realizadas en esta investigación una densidad constante en el tiempo de entre 2 y 4 personas/ m^2 es el rango óptimo para una evacuación rápida. Es por eso que un líder podría en principio manejar la velocidad de deseo (v_d) de los individuos o dosificar la acumulación en las cercanías de la puerta para mantenerse dentro de este rango.

Por lo tanto, la presencia de un líder, ya sea para individuos indecisos ($t_d = 2$ s) u obstinados ($t_d = 10$ s), resulta beneficiosa cuando la velocidad de deseo y la visibilidad es baja.

Hay dos motivos por los cuales considero que la evacuación se ve mejorada y es que por un lado y al igual que como sucedía cuando los individuos seguían la pared, encontrarse con el líder reduce el tiempo que deambulan por la habitación generando que encuentren la salida de forma más rápido. Sumado a esto, y si se tiene en cuenta que el rango de visión es bajo, la cantidad de individuos que se encuentran de forma simultánea con el líder es baja evitando que un grupo grande de personas se dirijan juntas hacia la salida lo que generaría un *“blocking cluster”* y en consecuencia se vería demorada la evacuación. Por otro lado, para visibilidades medias, el impacto que tiene para la mayoría de las velocidades de deseo (v_d) es pequeño y decrece a medida que esta última aumenta.

5.2. Comparaciones para evacuación siguiendo la pared.

Para el comportamiento en el cual los individuos evacuan siguiendo una pared (ver Sec. 4.2), la comparación se realizará respecto de una evacuación guiada desde el centro de la habitación. La comparación contra una evacuación guiada desde una pared presenta resultados muy similares a la evacuación en la que los individuos siguen la pared y por ese motivo se presenta en el Apéndice B

Teniendo en cuenta que no se observó una diferencia significativa en la evacuación de individuos indecisos u obstinados cuando se colocaba un líder dentro de la habitación (Figs. 4.9 y 4.12), las comparaciones de esta sección se realizarán únicamente para individuos indecisos ($t_d = 2$ s).

Seguimiento de la pared vs Líder centrado

La diferencia entre los tiempos de evacuación para ambos comportamientos, dada por la ec. 5.2, se presenta en la Fig. 5.4.

$$Dif = t_s - t_g \quad (5.2)$$

donde Dif es la diferencia entre los tiempos de cada tipo de comportamiento al evacuar, t_s es el tiempo que toma evacuar siguiendo la pared y t_g es el tiempo que toma evacuar con un líder. De esta manera, valores positivos implican cuánto tiempo de más lleva evacuar siguiendo la pared. Además se graficaron los tiempos de evacuación en función de la velocidad de deseo para cada comportamiento (Fig. 5.5) con el fin de determinar como impactan estas diferencias en la evacuación.

Por un lado, se tiene que ambos comportamientos son similares para visibilidades medias y altas, llegando a mejorar en casi un minuto la evacuación en el caso donde la visibilidad es de 5 m y los individuos tienen una velocidad de deseo de 1 m/s. Por otro lado, si la

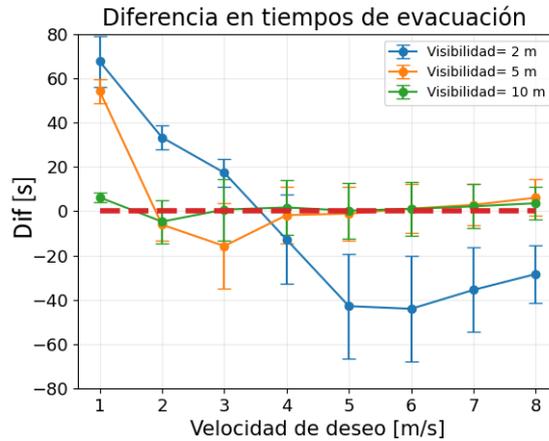


Figura 5.4: Diferencia entre tiempos de evacuación para los comportamientos de seguimiento de la pared y guiados por un líder en el centro de la habitación. La línea punteada (roja) muestra la referencia donde ambas evacuaciones son iguales, los valores positivos implican cuanto tiempo de más lleva evacuar siguiendo la pared, mientras que los valores negativos implican que la evacuación guiada desde el centro demora más. El período de actualización de la dirección de la velocidad de deseo es de $t_d = 2$ s. Las barras verticales representan la desviación típica de los datos.

visibilidad es baja se presentan dos comportamientos distintos en función de la velocidad de deseo. Si bien el líder empeora la evacuación para velocidades de deseo (v_d) mayores a 4 m/s entre un 20 % y un 50 %, la evacuación guiada sigue manteniéndose dentro de parámetros seguros según la tabla 1.1. Sin embargo, ubicar un líder en el centro de la habitación presenta una mejora de entre un 70 % y un 100 % a velocidades de deseo bajas donde la diferencia ganada en segundos puede resultar en una evacuación exitosa. Por lo tanto, un líder que logra reducir la velocidad de los individuos en la habitación generaría evacuaciones más veloces.

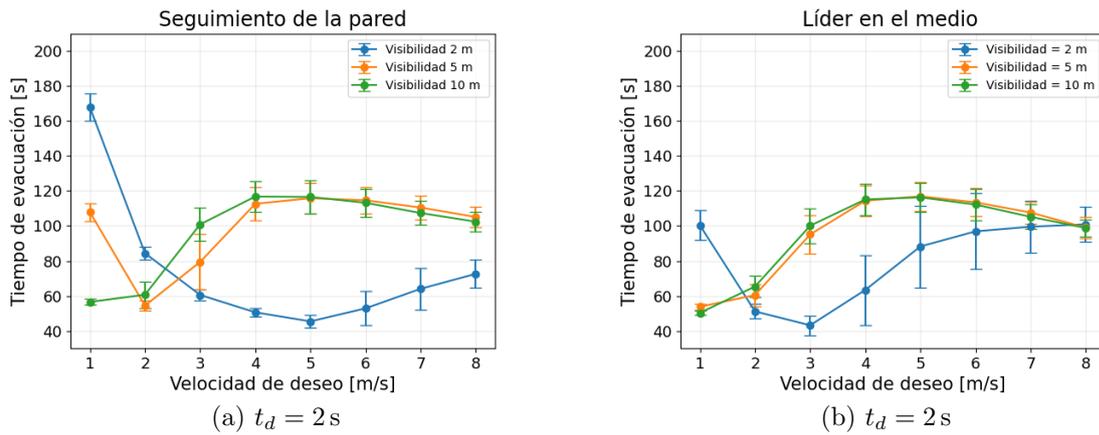


Figura 5.5: Tiempo de escape medio en función de la velocidad de deseo para visibilidades de 2m, 5m y 10m. Se comparan la evacuación cuando los individuos (a) siguen la pared en sentido antihorario, contra (b) son guiados por un líder desde el centro del recinto. El período de actualización de las direcciones era de $t_d = 2$ s y las barras verticales representan la desviación típica de los datos.

5.3. Comparaciones entre evacuaciones guiadas

Por último se realizó la comparación entre los comportamientos guiados (Sec. 4.3) de la siguiente manera:

- Líder centrado vs Líder contra una pared según los esquemas representados en las Figs. 4.8 y 4.10

Teniendo en cuenta que no se observó una diferencia significativa en la evacuación de individuos indecisos u obstinados cuando se colocaba un líder dentro de la habitación (Figs. 4.9, 4.9 y 4.12), las comparaciones de esta sección se realizarán solamente para individuos indecisos ($t_d = 2$ s).

5.3.1. Líder centrado vs Líder contra una pared

Por último y de la misma manera que en la comparación anterior, solo se comparó la evacuación para individuos ansiosos, cuando eran guiados por un líder desde el medio o desde una pared del recinto. Para ambas posiciones del líder cerca de una pared los resultados son similares a la Fig. 5.6. La misma se calculó en base a la siguiente ecuación:

$$Dif = t_m - t_p \quad (5.3)$$

donde Dif es la diferencia entre los tiempos de evacuación, t_m es el tiempo de evacuación cuando el líder se encuentra en el centro de la habitación y t_p cuando está sobre una pared. De esta manera valores positivos de Dif implican que una evacuación guiada desde el centro demora más que una guiada desde una pared.

A partir de esto se observa que la diferencia entre ambos comportamientos a la hora de evacuar únicamente afecta evacuaciones con visibilidades bajas. Dicho esto, la evacuación cuando el líder se encuentra en el centro de la habitación resultan más beneficiosa cuanto menor sea la velocidad de deseo de los individuos, mientras que para velocidades de deseo mayores a 4 m/s, ubicar al líder sobre una pared resulta mejor.

En este caso la evacuación solo tiene mejoras significativas para visibilidades bajas, donde domina la evacuación con un líder centralizado. Si bien un líder sobre alguna pared del recinto favorece la evacuación con velocidades de deseo (v_d) mayores a 4 m/s, que entorpece la salida para velocidades de deseo (v_d) menores. Un vistazo a las Figs. 4.9a y 4.12a revela que el régimen donde más impacto puede tener una optimización de la evacuación es el régimen de velocidades bajas, y en particular $v_d = 2$ m/s, ya que los tiempos de evacuación superan los 90 segundos establecidos por la tabla 1.1. Es por esto que considero que colocar un líder en el centro de la habitación trae mejores beneficios que uno sobre alguna de las paredes.

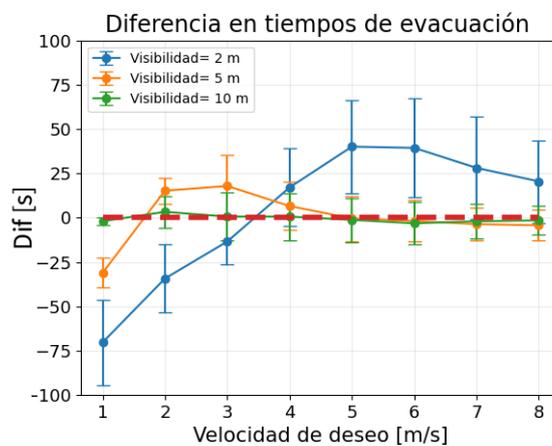


Figura 5.6: Diferencia entre tiempos de evacuación para los comportamientos guiados con un líder en el centro de la habitación o cercano a una pared. La línea punteada (roja) muestra la referencia donde ambas evacuaciones son iguales, los valores positivos implican cuanto tiempo de más lleva evacuar cuando líder se encuentra centrado mientras que los valores negativos implican que la evacuación con un líder sobre la pared izquierda demora más. Sólo se consideraron individuos indecisos $t_d = 2 s$. Las barras verticales representan la desviación típica de los datos.

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo se estudiaron tres estrategias distintas para evacuaciones de emergencias en condiciones de baja visibilidad utilizando una modificación al modelo de fuerza social. En primer lugar, se analizaron situaciones en las que los individuos buscaban la salida eligiendo la dirección en la que iban a moverse de manera aleatoria, cambiando la misma cada un período t_d .

En segundo lugar, se simuló que sucedía cuando los individuos realizaban este mismo tipo de caminata aleatoria hasta encontrar una pared, en cuyo caso cambiaban su comportamiento para seguir caminando paralelos a la pared que habían encontrado en sentido anti-horario.

En tercer lugar, se estudió la evacuación cuando se colocaba un líder fijo dentro del recinto que indicaba la salida a los individuos que entraban en su rango de visión. A su vez se estudiaron tres posiciones distintas para el líder, en el centro de la habitación, o bien, junto a distintas paredes dentro del recinto.

En conclusión, el comportamiento de caminata aleatoria resultó ser el menos eficiente, ya que los individuos deambulan por el recinto demasiado tiempo antes de encontrar la salida. Sin embargo, este escenario es un poco más eficiente en los casos de velocidades de deseo bajas cuando la visibilidad es alta y al revés, con velocidades de deseo altas para

visibilidades bajas (ver Sec. 4.1, Fig. 4.4b). Además, mantener la dirección elegida por más tiempo mejora las chances de encontrar la salida más rápidamente.

Por otro lado, si lo que se busca es mejorar la evacuación por medio de una estrategia activa, se puede inducir el seguimiento de una pared (señalización), o ubicar un líder en alguna de las paredes que no contienen a la puerta. Ambas opciones se comportaron de igual manera durante las simulaciones realizadas, y si bien a visibilidades altas no presentan ventajas significativas frente a la caminata aleatoria, si lo hacen en visibilidades bajas (en el contexto de modelo de fuerza social).

Por último, tenemos la evacuación con una posición centralizada del líder. En este caso, si bien la evacuación mejora mucho respecto a una caminata aleatoria, si lo comparamos con el comportamiento de seguir la pared (con o sin líder en la misma), el líder central solo mejora significativamente los tiempos de evacuación si la velocidad de deseo (v_d) es menor a 4 m/s. En velocidades de deseo altas lo que sucede es que el líder señala la salida a individuos muy ansiosos, que terminan generando “blocking clusters” que demoran el proceso de evacuación.

La conclusión final a la que arribamos es que un líder que indique la salida solo es realmente útil si mantiene un rol activo (inteligente) y logra dosificar la cantidad de gente que se acumula en las cercanías de la puerta.

Resumiendo las conclusiones de la investigación tenemos que:

- La evacuación mediante caminata aleatoria resultó ser la menos eficiente. De elegirse este método de evacuación es recomendable mantener la dirección elegida por más tiempo, en busca de información.
- Se mostró que evacuaciones siguiendo la pared o colocando un líder contra una de las paredes del recinto no produce una diferencia significativa en los tiempos de evacuación cuando se las compara entre si. Sin embargo, mejora mucho la evacuación

frente a la caminata aleatoria cuando la visibilidad es baja.

- Ubicar un líder en el medio de la habitación genera diferencias con evacuaciones donde se sigue la pared, la discusión se pueden ver en la Sección 6.

Perspectivas

A partir de la investigación realizada se abren varias direcciones de trabajo:

- Por un lado, se podría estudiar distintos comportamientos del líder, donde en vez de re-dirigir únicamente a los individuos a la salida, además cambie sus indicaciones en función de la cantidad de gente que se encuentra intentando salir por la puerta.
- Una segunda posibilidad consiste en incluir múltiples líderes en el caso de que los individuos sigan las paredes, aunque no todos se muevan en el mismo sentido. Este caso puede ser muy complejo si no todos los individuos hacen caso a las indicaciones.
- Por último podría analizarse un contexto combinado, donde el líder en vez de direccionar a la puerta dirige a las personas hacia la pared mas cercana y les indica el sentido en el que deben recorrerla.

Agradecimientos

A Guillermo Frank, Claudio Dorso, Ignacio Sticco y Fernando Cornes. Su buena predisposición, su pasión por enseñar y sus consejos fueron muy importantes en esta etapa. Me llevo enseñanzas fundamentales para mi vida profesional.

A mi esposa María Cecilia, sin su apoyo incondicional no hubiese llegado a donde estoy hoy. Gracias por los múltiples esfuerzos que hiciste a lo largo de estos años para que yo pueda avanzar con la carrera. Me ayudas a mejorar todos los días y me motivas a buscar mi mejor versión.

A mis padres, por estar siempre, festejando los logros y acompañandome en los fracasos. Son mis modelos a seguir, hoy siendo padre los miro y espero poder transmitirle a María Emilia todo lo que me enseñaron.

A mis hermanos, porque siempre conté con ellos y sé que lo puedo seguir haciendo. Mantengamos este vínculo tan fuerte que nos une.

A mis abuelos, por todo lo que significan en mi vida. Me hubiera gustado que pudieran estar presentes en este momento.

A mis amigos por todos los buenos momentos que pasamos juntos. Gracias por todas las juntadas, fueran a estudiar o a despejarnos. Sin ustedes no estaría acá.

Quería agradecer también a todo el personal de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, considero que la carrera no solo me dió conocimientos teóricos sino que me formó como persona y profesional.

Por último quiero dedicarle este trabajo a mi hija, María Emilia. Estos últimos meses fueron los más movidos y felices de mi vida. No puedo esperar a verte crecer.

Contacto

Patricio Montaron: patriciomontaron@gmail.com

Dr. Guillermo Frank: guillermo.frank@gmail.com

Dr. Claudio Dorso: codorso@df.uba.ar

Apéndices

Apéndice A

Comparación entre caminata aleatoria y evacuación guiada

Caminata aleatoria vs Líder centrado

La Fig. 6.1 muestra que el cambio de eficacia entre los comportamientos a velocidades de entre 5 m/s y 6 m/s a visibilidades bajas, se debe a la formación de *blocking clusters*.

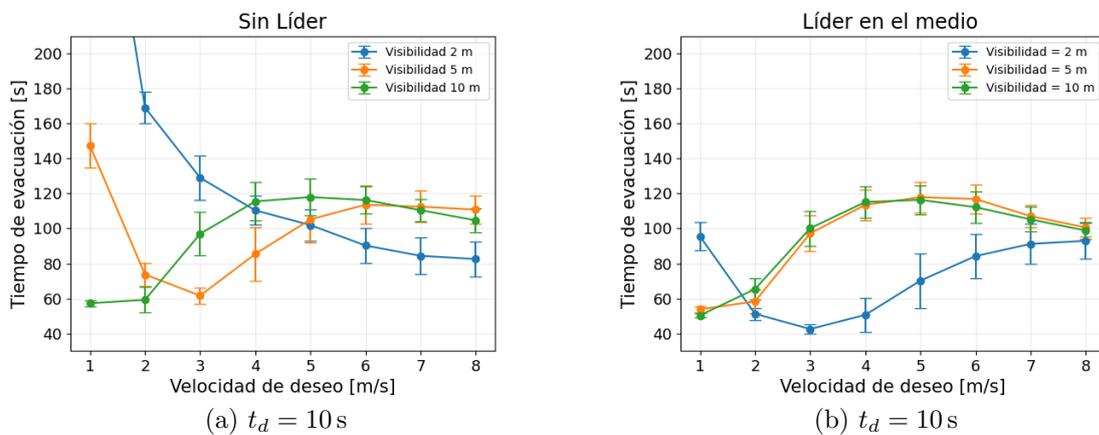


Figura 6.1: Tiempo de escape medio en función de la velocidad de deseo para visibilidades de 2m, 5m y 10m. Se comparan (a) la evacuación cuando se realiza una caminata aleatoria sin líder, contra (b) una caminata aleatoria con un líder en el centro de la habitación. En ambos casos se consideraron individuos obstinados. Las barras verticales representan la desviación típica de los datos.

Caminata aleatoria vs Líder contra una pared

En esta sección se comparan los tiempos de evacuación de una caminata aleatoria frente a distintas ubicaciones de un guía dentro de la habitación. En particular se estudiaron las

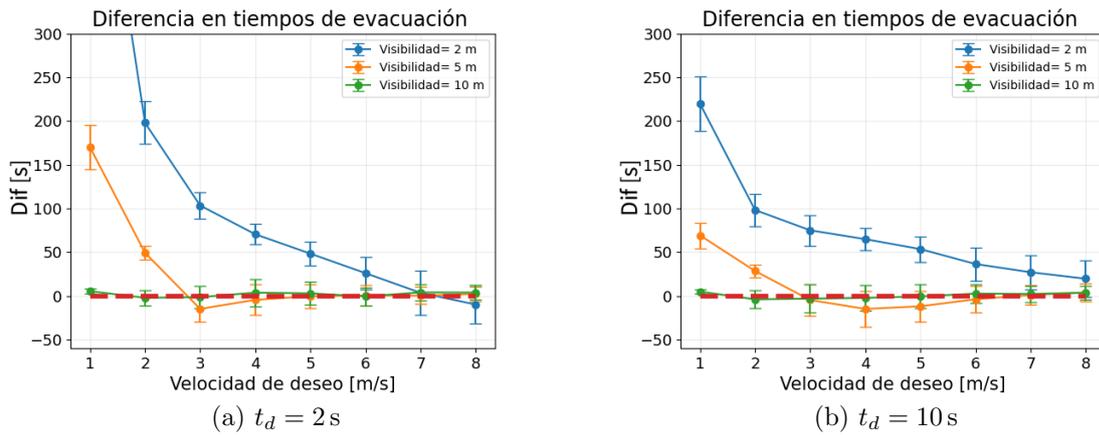


Figura 6.2: Diferencia entre tiempos de evacuación para los comportamientos de caminata aleatoria y guiados por un líder ubicado en la pared izquierda del recinto para individuos (a) indecisos y (b) obstinados. La línea punteada (roja) muestra la referencia donde ambas evacuaciones son iguales, los valores positivos implican cuanto tiempo de más lleva evacuar eligiendo direcciones aleatorias mientras que los valores negativos implican que la evacuación guiada demora más. Las barras verticales representan la desviación típica de los datos.

posiciones mostradas en las Figs. 4.10a y 4.10b, y se graficó la diferencia entre los tiempos de evacuación (Figs. 6.2 y 6.3) tanto para individuos indecisos como para obstinados.

En ambos casos se observa que la presencia de un líder genera, como mínimo, una mejora en los tiempos de evacuación. Esta misma se presenta en los casos de visibilidad baja, para toda velocidad de deseo, y en los casos de visibilidad media, sólo en casos de que los individuos evacuen con velocidades de deseo bajas (entre 1 m/s y 2 m/s). Si bien existen casos donde la evacuación guiada empeora la salida, se considera que los casos son puntuales y el efecto negativo que puede traer no es lo suficientemente grande como para no considerarla un método más eficaz que una caminata aleatoria.

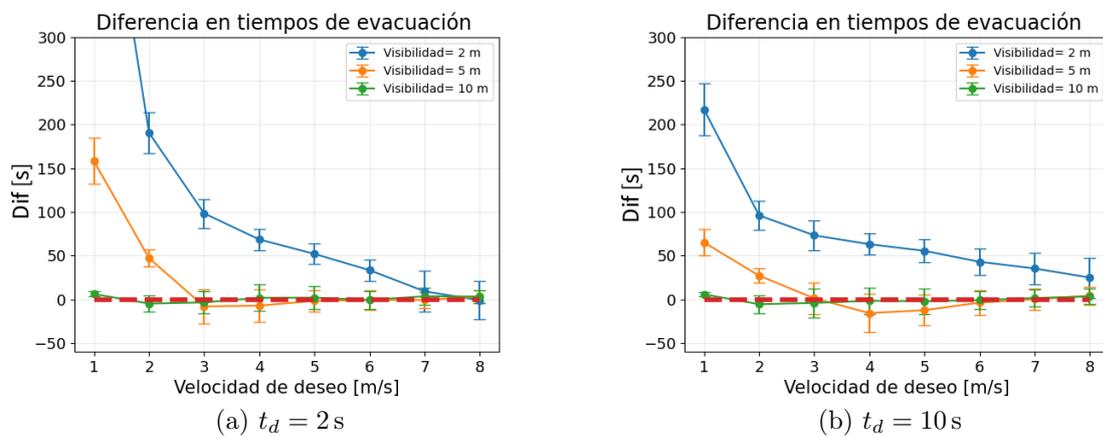


Figura 6.3: Diferencia entre tiempos de evacuación para individuos indecisos u obstinados con comportamientos de caminata aleatoria y guiados por un líder ubicado en la pared opuesta a la salida. La línea punteada (roja) muestra la referencia donde ambas evacuaciones son iguales, los valores positivos implican cuanto tiempo de más lleva evacuar con una caminata aleatoria mientras que los valores negativos implican que la evacuación guiada demora más. Las barras verticales representan la desviación típica de los datos.

Apéndice B

Comparación entre seguimiento de la pared y evacuación guiada

Seguimiento de la pared vs Líder contra una pared

Comparando el comportamiento en el cual los individuos siguen la pared en sentido anti-horario contra las dos ubicaciones donde el líder se encuentra cerca de una pared, podemos ver (Fig. 6.4) que los tiempos de evacuación son similares para prácticamente todas las combinaciones de velocidad de deseo (v_d) y visibilidad.

Sucedo que si bien las posibilidades de ver al líder son menores porque los individuos arrancan lejos, a medida que lo van encontrando este envía de forma directa a los individuos hacia la puerta generando un efecto similar al que tienen individuos que siguen la pared. En este último caso, si bien es tienen más probabilidades de encontrarse con la pared, pueden terminar recorriendo una distancia mucho mayor dependiendo de que punto de la pared se encontró.

Por lo tanto ubicar un líder en alguna de las paredes genera evacuaciones similares a aquellas en las que los individuos deciden seguir una pared todos en el mismo sentido. Habría que explorar que sucede con múltiples guías ya podría suceder que estos terminen saturando la salida.

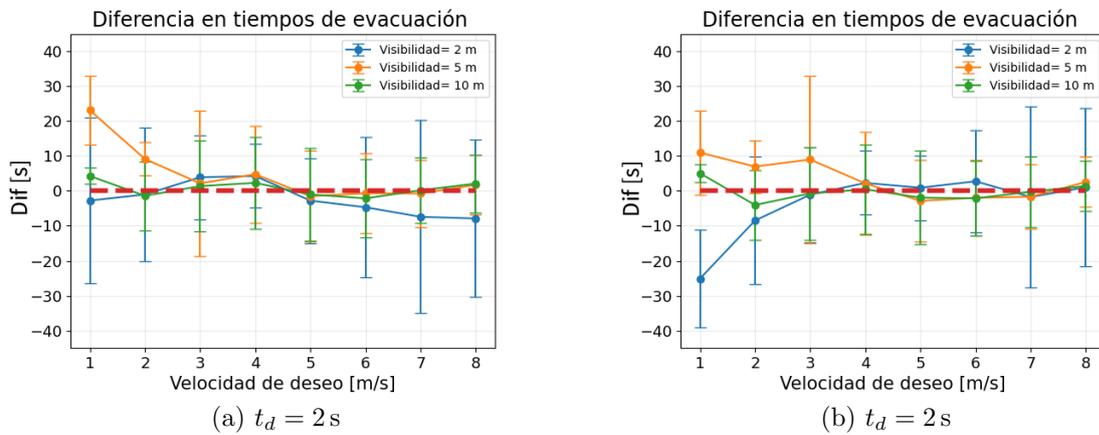


Figura 6.4: Diferencia entre tiempos de evacuación para individuos indecisos, donde los comportamientos analizados son individuos que siguen la pared o son guiados por un líder ubicado sobre (a) la pared izquierda del recinto (b) la pared opuesta a la puerta. La línea punteada (roja) muestra la referencia donde ambas evacuaciones son iguales, los valores positivos implican cuanto tiempo de más lleva evacuar siguiendo la pared mientras que los valores negativos implican que la evacuación guiada demora más. Las barras verticales representan la desviación típica de los datos.

Apéndice C

Estudio de las curvas de descarga

En esta sección se muestran, en la Fig. 6.5, las curvas de descarga correspondientes a individuos indecisos que evacúan realizando una caminata al azar. Idealmente una curva de nivel debería tener una pendiente lo más empinada y parecida a una recta posible, para asegurarse un flujo constante de individuos a través de la puerta. Las *mesetas* en estos gráficos corresponden a *blocking clusters* que se acumulan en la salida y no permiten a los individuos evacuar.

Según lo discutido en la Sección 4.1.1 la densidad óptima para la evacuación ronda entre las 2 y 4 personas/m². Para comprobar esto, se graficaron curvas de descarga para determinadas combinaciones entre valores de velocidad de deseo y visibilidad. Por un lado, (Fig. 6.5a) se graficaron las curvas de descarga para velocidades bajas ($v_d = 2$ m/s) con visibilidades de 2 m (densidad de 1 persona/m² o menor) y 6m (densidad de 2 o 3 personas/m²). Por el otro, la Fig. 6.5b, compara las mismas visibilidades, 2 m (densidad de 3 o 4 personas/m²) y 6 m (densidades mayores a 6 personas/m²) pero para velocidades altas ($v_d = 2$ m/s).

Resulta claro a partir de los gráficos que las combinaciones de visibilidad y velocidad de deseo donde la densidad de individuos a través de la puerta se encuentra rondando las 4 personas/m², tienen pendientes más grandes que aquellas donde la densidad distinta a este número. Esto refuerza los resultados de la Sección 4.1.1 de que lo importante a la hora de evacuar es manejar la densidad en las cercanías de la puerta.

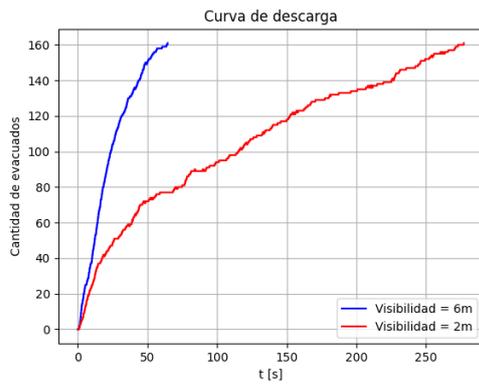
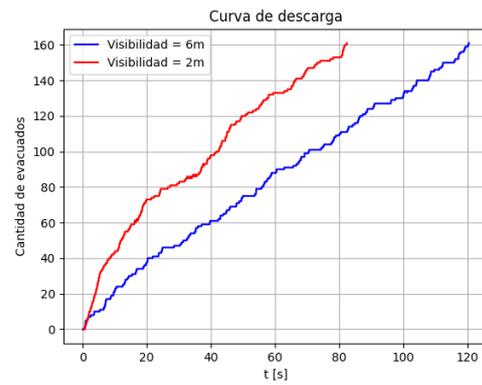
(a) $v_d = 2$ m/s(b) $v_d = 6$ m/s

Figura 6.5: Curva de descarga para individuos indecisos ($t_d = 2$ s) con distintas visibilidades.

Bibliografía

- [1] LF Henderson. The statistics of crowd fluids. nature, 229(5284):381–383, 1971.
- [2] Leroy F Henderson. On the fluid mechanics of human crowd motion. Transportation research, 8(6):509–515, 1974.
- [3] Fiammetta Venuti, Luca Bruno, and Nicola Bellomo. Crowd dynamics on a moving platform: Mathematical modelling and application to lively footbridges. Mathematical and Computer Modelling, 45(3-4):252–269, 2007.
- [4] Pierre Degond, Cécile Appert-Rolland, Mehdi Moussaid, Julien Pettré, and Guy Theraulaz. A hierarchy of heuristic-based models of crowd dynamics. Journal of Statistical Physics, 152:1033–1068, 2013.
- [5] Juan Pablo Agnelli, Francesca Colasuonno, and Damian Knopoff. A kinetic theory approach to the dynamics of crowd evacuation from bounded domains. Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 25(01):109–129, 2015.
- [6] Serge Hoogendoorn and Piet HL Bovy. Gas-kinetic modeling and simulation of pedestrian flows. Transportation Research Record, 1710(1):28–36, 2000.
- [7] Victor J Blue and Jeffrey L Adler. Emergent fundamental pedestrian flows from cellular automata microsimulation. Transportation Research Record, 1644(1):29–36, 1998.
- [8] Xiao-Xia Jian, SC Wong, Peng Zhang, Keechoo Choi, Hong Li, and Xiaoning Zhang. Perceived cost potential field cellular automata model with an aggregated force field for pedestrian dynamics. Transportation research part C: emerging technologies, 42:200–210, 2014.

- [9] YF Yu and WG Song. Cellular automaton simulation of pedestrian counter flow considering the surrounding environment. Physical Review E, 75(4):046112, 2007.
- [10] J Farhan. An agent-based multimodal simulation model for capacity planning of a cross-border transit facility. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 60:189–210, 2015.
- [11] WL Wang, SM Lo, SB Liu, and H Kuang. Microscopic modeling of pedestrian movement behavior: Interacting with visual attractors in the environment. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 44:21–33, 2014.
- [12] Haizhong Wang, Alireza Mostafizi, Lori A Cramer, Dan Cox, and Hyongsu Park. An agent-based model of a multimodal near-field tsunami evacuation: Decision-making and life safety. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 64:86–100, 2016.
- [13] Weihao Yin, Pamela Murray-Tuite, Satish V Ukkusuri, and Hugh Gladwin. An agent-based modeling system for travel demand simulation for hurricane evacuation. Transportation research part C: emerging technologies, 42:44–59, 2014.
- [14] Bharat Kunwar, Filippo Simini, and Anders Johansson. Evacuation time estimate for total pedestrian evacuation using a queuing network model and volunteered geographic information. Physical Review E, 93(3):032311, 2016.
- [15] Gunnar G Løvås. Modeling and simulation of pedestrian traffic flow. Transportation Research Part B: Methodological, 28(6):429–443, 1994.
- [16] Dirk Helbing and Peter Molnar. Social force model for pedestrian dynamics. Physical review E, 51(5):4282, 1995.
- [17] Dirk Helbing, Illés Farkas, and Tamas Vicsek. Simulating dynamical features of escape panic. Nature, 407(6803):487–490, 2000.
- [18] Daniel Ricardo Parisi and Claudio Oscar Dorso. Microscopic dynamics of pedestrian evacuation. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 354:606–618, 2005.
- [19] Guillermo Alberto Frank and Claudio Oscar Dorso. Room evacuation in the presence of an obstacle. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 390(11):2135–2145, 2011.

- [20] Guillermo Alberto Frank and Claudio Oscar Dorso. Panic evacuation of single pedestrians and couples. International Journal of Modern Physics C, 27(08):1650091, 2016.
- [21] Guillermo A Frank and Claudio O Dorso. Evacuation under limited visibility. International Journal of Modern Physics C, 26(01):1550005, 2015.
- [22] Motonari Isobe, Dirk Helbing, and Takashi Nagatani. Experiment, theory, and simulation of the evacuation of a room without visibility. Physical Review E, 69(6):066132, 2004.
- [23] Daniel Ricardo Parisi and Claudio Oscar Dorso. Morphological and dynamical aspects of the room evacuation process. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 385(1):343–355, 2007.
- [24] Ignacio Mariano Sticco, Guillermo Alberto Frank, Fernando Ezequiel Cornes, and Claudio Oscar Dorso. A re-examination of the role of friction in the original social force model. Safety science, 121:42–53, 2020.
- [25] Fernando Ezequiel Cornes, Guillermo Alberto Frank, and Claudio Oscar Dorso. Microscopic dynamics of the evacuation phenomena in the context of the social force model. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 568:125744, 2021.
- [26] Ignacio Mariano Sticco, Guillermo Alberto Frank, S Cerrotta, and Claudio Oscar Dorso. Room evacuation through two contiguous exits. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 474:172–185, 2017.
- [27] Daniel R Parisi, Alan G Sartorio, Joaquín R Colonnello, Angel Garcimartín, Luis A Pugnaroni, and Iker Zuriguel. Pedestrian dynamics at the running of the bulls evidence an inaccessible region in the fundamental diagram. Proceedings of the National Academy of Sciences, 118(50):e2107827118, 2021.
- [28] Milad Haghani, Majid Sarvi, and Zahra Shahhoseini. When ‘push’ does not come to ‘shove’: Revisiting ‘faster is slower’ in collective egress of human crowds. Transportation research part A: policy and practice, 122:51–69, 2019.
- [29] Wang Jianyu, Ma Jian, Lin Peng, Chen Juan, Fu Zhijian, Li Tao, and Majid Sarvi. Experimental study of architectural adjustments on pedestrian flow fea-

- tures at bottlenecks. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2019(8):083402, 2019.
- [30] Juliane Adrian, Maik Boltes, Stefan Holl, Anna Sieben, and Armin Seyfried. Crowding and queuing in entrance scenarios: influence of corridor width in front of bottlenecks. arXiv preprint arXiv:1810.07424, 2018.
- [31] Angel Garcimartín, Daniel R Parisi, Jose M Pastor, César Martín-Gómez, and Iker Zuriguel. Flow of pedestrians through narrow doors with different competitiveness. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2016(4):043402, 2016.
- [32] Weichen Liao, Armin Seyfried, Jun Zhang, Maik Boltes, Xiaoping Zheng, and Ying Zhao. Experimental study on pedestrian flow through wide bottleneck. Transportation Research Procedia, 2:26–33, 2014.
- [33] W Daamen and SP Hoogendoorn. Emergency door capacity: influence of door width, population composition and stress level. Fire technology, 48:55–71, 2012.
- [34] Jack Liddle, Armin Seyfried, Bernhard Steffen, Wolfram Klingsch, Tobias Rupprecht, Andreas Winkens, and Maik Boltes. Microscopic insights into pedestrian motion through a bottleneck, resolving spatial and temporal variations. arXiv preprint arXiv:1105.1532, 2011.
- [35] Armin Seyfried, Oliver Passon, Bernhard Steffen, Maik Boltes, Tobias Rupprecht, and Wolfram Klingsch. New insights into pedestrian flow through bottlenecks. Transportation Science, 43(3):395–406, 2009.
- [36] Jack Liddle, Armin Seyfried, Wolfram Klingsch, Tobias Rupprecht, Andreas Schadschneider, and Andreas Winkens. An experimental study of pedestrian congestions: influence of bottleneck width and length. arXiv preprint arXiv:0911.4350, 2009.
- [37] Nirajan Shiwakoti, Xiaomeng Shi, Zhirui Ye, Yiwen Liu, and Junkai Lin. A comparative study of pedestrian crowd flow at middle and corner exits. In Proceedings of the Australasian Transport Research Forum 2016, 2016.
- [38] Rodrigo Escobar and Armando De La Rosa. Architectural design for the survival optimization of panicking fleeing victims. In Advances in Artificial Life: 7th European

- Conference, ECAL 2003, Dortmund, Germany, September 14-17, 2003. Proceedings 7, pages 97–106. Springer, 2003.
- [39] Alexandre Nicolas, Sebastián Bouzat, and Marcelo N Kuperman. Pedestrian flows through a narrow doorway: Effect of individual behaviours on the global flow and microscopic dynamics. Transportation Research Part B: Methodological, 99:30–43, 2017.
- [40] Tadahisa Jin et al. Studies on human behavior and tenability in fire smoke. Fire Safety Science, 5:3–21, 1997.
- [41] Dirk Oberhagemann. Static and dynamic crowd densities at major public events. Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V.(vfdb), German Fire Protection Association, Technical-scientific advisory board (TWB), Department, 13:13–01, 2012.
- [42] Mads Mysen, Sveinung Berntsen, Per Nafstad, and Peter G Schild. Occupancy density and benefits of demand-controlled ventilation in norwegian primary schools. Energy and Buildings, 37(12):1234–1240, 2005.
- [43] Abraham Michael Hasofer and Isabelle Thomas. Analysis of fatalities and injuries in building fire statistics. Fire Safety Journal, 41(1):2–14, 2006.
- [44] H HAH LAX Stone, DONALD W Rhame, JOHN D Corbitt, KS Given, and JD Martin Jr. Respiratory burns: a correlation of clinical and laboratory results. Annals of surgery, 165(2):157, 1967.
- [45] Tadahisa Jin. Studies of emotional instability in smoke from fires. 1981.
- [46] Mark Goldstein. Carbon monoxide poisoning. Journal of Emergency Nursing, 34(6):538–542, 2008.
- [47] Maarit Tuomisaari. Visibility of exit signs and low-location lighting in smoky conditions. VTT, Technical Research Centre of Finland Espoo, Finland, 1997.
- [48] Karl Fridolf, Enrico Ronchi, Daniel Nilsson, and Håkan Frantzich. Movement speed and exit choice in smoke-filled rail tunnels. Fire safety journal, 59:8–21, 2013.
- [49] Eric A Rozan, Guillermo Alberto Frank, Fernando E Cornes, Ignacio M Sticco, and

Claudio Oscar Dorso. Microscopic dynamics of escaping groups through an exit and a corridor. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 597:127271, 2022.

- [50] James M Haile. Molecular dynamics simulation: elementary methods. John Wiley & Sons, Inc., 1992.

Tesis disponible bajo Licencia Creative Commons, Atribución – No Comercial –
Compartir Igual (by-nc-sa) 2.5 Argentina Buenos Aires, 2023