



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Física

**Modelado y calibración en dinámica peatonal:
propuestas para mejorar las evacuaciones
en estado de pánico**

Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de
Buenos Aires en el área Ciencias Físicas

Lic. Ignacio Mariano Sticco

Director de tesis: Dr. Guillermo Alberto Frank

Consejero de Estudios: Dr. Ariel Chernomoretz

Lugar de trabajo: Instituto de Física de Buenos Aires (IFIBA)

Buenos Aires, 2023

Modelado y calibración en dinámica peatonal: propuestas para mejorar las evacuaciones en estado de pánico

Resumen

Esta tesis estudia la dinámica de multitudes en estado de pánico. Para describir el comportamiento de dichas multitudes se utiliza el modelo de fuerza social de Helbing. En este modelo los individuos se representan como discos blandos que están sometidos a distintos tipos de fuerzas, y la evolución temporal del sistema queda determinada por las ecuaciones de movimiento de la mecánica clásica. La ventaja de este modelo es que permite estudiar fenómenos macroscópicos de la multitud sin perder detalle del carácter microscópico de los individuos que la componen.

En primer lugar, se explora el rol de las fuerzas de contacto entre individuos (la fuerza de fricción y la fuerza de repulsión corporal). En particular, se analizan los efectos que produce variar el parámetro de rigidez del cuerpo humano. Se observó que variar dicho parámetro produce efectos muy distintos según el recinto en el cual se encuentre la multitud. En un recinto con puerta angosta (“*bottleneck*”) el tiempo de evacuación disminuye a medida que la rigidez aumenta. Por otro lado, en un recinto tipo pasillo sucede lo contrario (la velocidad de la multitud disminuye al aumentar la rigidez). Estas diferencias se pueden explicar por el rol que juega la fricción entre individuos, o bien, entre individuos y pared. La primera es decisiva en el caso de “*bottlenecks*”, mientras que la segunda es más relevante en pasillos.

Una vez explorados los efectos de las fuerzas de contacto entre individuos, se realizó una calibración de los parámetros usando datos empíricos de la vida real, similares a los esperados para una evacuación de emergencia (video de *Black Friday*). Se aplicaron métodos de optimización para determinar un conjunto de parámetros en el modelo de fuerza social que sea compatible con los datos empíricos. Los parámetros obtenidos muestran una mejor performance que los parámetros usualmente utilizados en la literatura actual.

La última etapa de la tesis consistió en explorar mejoras estructurales para las evacuaciones de emergencia (a partir de la re-calibración realizada). El análisis se enfocó en recintos con vestíbulos de diferentes características. El vestíbulo está definido como la sala inmediata a la puerta de salida. Se concluyó que, bajo ciertas condiciones estructurales, los vestíbulos mejoran las evacuaciones de emergencia por dos motivos. Por un lado, incrementan el flujo de evacuación, por otro lado, disminuyen la presión que soportan los individuos. El aumento del flujo se debe al hecho que los vestíbulos son capaces de regular la densidad en la vecindad de la puerta de salida. El flujo se maximiza cuando se obtiene la máxima densidad posible tal que no formen *blocking clusters* en la puerta de salida. Además, la presión disminuye porque los vestíbulos obligan a la multitud a dispersarse más (eso produce una disminución de la densidad global).

Los resultados de esta tesis son una contribución a reducir el riesgo de tragedia en estampidas humanas. Esperamos que este trabajo sea una fuente de inspiración para futuras investigaciones y dé origen a soluciones inter-disciplinarias que mejoren las evacuaciones en situaciones de emergencia.

Palabras clave: dinámica peatonal, pánico, evacuaciones, dinámica molecular, modelo de fuerza social

Pedestrian dynamic modeling and calibration: proposals to improve panic evacuations

Abstract

This thesis studies the crowd dynamics in a state of panic. To describe the behavior of these crowds, the social force model is used. In this model, individuals are represented as soft discs that are subjected to different types of forces, and the temporal evolution of the system is determined by the equations of motion of classical mechanics. The advantage of this model is that it allows studying macroscopic phenomena of the crowd without losing detail of the microscopic character of the individuals that compose it.

The role of the contact forces between individuals (the friction force and the body repulsion force) is explored in the first place. In particular, the effects of varying the stiffness parameter of the human body are analyzed. It was observed that varying this parameter produces very different effects depending on the type of room in which the crowd is located. In a room with a narrow door (“bottleneck”) the evacuation time decreases as the stiffness increases. On the other hand, in a corridor-type room the opposite happens (the speed of the crowd decreases with increasing stiffness). These differences can be explained by the role played by friction between individuals, or between individuals and the wall. The first is decisive in the case of “bottlenecks”, while the second is more relevant in corridors.

Once the effects of contact forces between individuals were explored, a calibration of the parameters was performed using empirical data from real life, similar to that expected for an emergency evacuation (Black Friday video). Optimization methods were applied to determine a set of parameters in the social force model that is compatible with the empirical data. The parameters obtained show a better performance than the parameters usually applied in the current literature.

The last stage of the thesis consisted of exploring structural improvements for emergency evacuations (based on the re-calibration carried out). The analysis focused on rooms with vestibules of different characteristics. The vestibule is defined as the room next to the exit door. It was concluded that, under certain structural conditions, vestibules improve emergency evacuations for two reasons. On one hand, they increase the evacuation flow, on the other hand, they reduce the pressure that individuals support. The increased flow is due to the fact that the vestibules are able to regulate the density in the vicinity of the exit door. The flow gets maximized when the vestibule achieves the maximum density such that no blocking clusters are produced at the exit door. Moreover, the pressure decreases because the vestibule forces the crowd to spread out more (resulting in an overall decrease in density).

The results of this thesis are a contribution to reducing the risk of tragedy in human stampedes. We hope that this work will be a valuable source of inspiration for future research and give rise to interdisciplinary solutions that improve evacuations in emergency situations.

Keywords: pedestrian dynamics, panic, evacuation, molecular dynamic, social force model

Agradecimientos

Haber concluido esta tesis no lo siento como un logro individual sino más bien como un logro colectivo. Detrás de cada párrafo, cada gráfico y cada ecuación, se esconde el apoyo de muchas personas que desde distintos lugares y de diferente forma empujaron para que todo esto sea posible.

En primer lugar le quiero agradecer a mi director Claudio Dorso. Esta investigación no hubiera tenido el impacto que está teniendo en la comunidad de dinámica peatonal si no hubiese sido por su aporte. Dorso tiene un entusiasmo contagioso que me permitió aprender muchas cosas, no solo vinculadas a lo académico sino también a lo humano. Trabajar con Dorso es una experiencia divertida y enriquecedora que fui valorando cada vez más. Estoy seguro que dentro de unos años voy a recordar mis tiempos de estudiante de doctorado y me voy a arrepentir de no haber aprendido más de él. Dorso tiene una mente tan afilada como sus cuchillos y un corazón tan grande como la fuente de fideos que te comparte cada vez que vas a su casa. En definitiva, quiero agradecerle por haberme dado la oportunidad de trabajar (y conocer) a un excelente investigador y una excelente persona.

También quiero agradecerle a mi segundo director, Guillermo Frank. Por estar día a día atento al desarrollo de la investigación. Siempre ayudando de forma espontánea. Su apoyo fue clave desde el principio (por la paciencia que me tuvo cuando no sabía programar) hasta el final, por sus discusiones profundas que enriquecieron la investigación. Guille es una persona absolutamente bondadosa y tiene una vocación docente que es admirable. Espero algún día llegar a ser el 50 % de lo buen docente que es él. Con eso es más que suficiente para ser un excelente profesor.

A lo largo de estos años pude conocer a muchos compañeros de trabajo que terminaron siendo amigos. A Fernando Cornes, con quien somos compañeros de trabajo, colaboradores científicos y tenemos una gran amistad desde la tesis de licenciatura. A Eric Rozán, con quien fue un placer trabajar y mantenemos una excelente amistad a pesar de la distancia. Con ellos he compartido muchas salidas por plaza Serrano en donde no solo tomamos cerveza sino que además practicamos el nerdismo y el chusmerío universitario en iguales proporciones.

A la gente con quien compartí poco tiempo pero agradezco mucho haberla conocido. Pablo Alcaín, Facundo Pugliese, Patricio Montaron y Guillermo Pascualetti. También a Hernan Benitez, que a pesar de lo poco que nos conocemos ya puedo decir que somos amigos y estoy seguro que va a aportar mucho al grupo de trabajo.

También quiero agradecer a dos colaboradoras que hicieron sus cursos de Laboratorio 6 y 7 en nuestro grupo de trabajo. Ellas son Ayelen Santos y Josefina Catoni. Ambas son muy buenas alumnas y muy buenas personas. Diseñaron y crearon un chaleco para medir la fuerza de contacto que soporta un ser humano. Lo utilizamos para tener referencia de la fuerza a la que está sometido un pasajero en un transporte público con mucha densidad de gente. Su aporte fue muy valioso para el grupo y para esta tesis.

A mis compañeros de oficina Sebastián Pinto y Marcelo Otero. Seba me ha compartido miles de mates y hemos tenido charlas interesantísimas que cubren todos los temas imaginados. Marce, que ya es considerado el gurú de los becarios por sus consejos valiosos y desvergonzados, propios de un hermano mayor académico. La buena onda en el ambiente de trabajo es fundamental. Por eso le quiero agradecer a los dos.

Es imposible desarrollar un doctorado sin instituciones que lo permitan. Por eso quiero agradecerle a Conicet por haberme otorgado la beca, a la Universidad de Buenos Aires por haberme admitido a la carrera de doctorado y al Estado Argentino. Por más que muchas veces nos quejemos de la administración de nuestros gobiernos, debemos estar orgullosos y ser agradecidos de que en Argentina haya una política científica que permite tener instituciones de primer nivel mundial.

También quiero agradecer a las personas que con su trabajo contribuyeron a esta tesis. A Martín Santos, Andrés Benavidez y Roberto Dhios (a quien siempre vamos a extrañar). Ellos aportaron mucho para que las computadoras del cluster y de las oficinas funcionen correctamente. Nunca dudaron en solucionar todos los problemas que fueron apareciendo en el camino (que por cierto fueron muchos).

Quiero agradecer a Mariano Mayochi porque la puerta de su oficina siempre está abierta (metafórica y literalmente). Mariano siempre está dispuesto a ayudar con la máxima empatía y con el mayor nivel de profesionalismo.

A mi consejero de estudios Ariel Chernomoretz y a mi vecino de oficinas Pablo Balenzuela por los buenos momentos tanto en la facu como en los congresos que hemos compartido.

Agradezco también a los jurados: Marcelo Kuperman, Luis Pugnaroni, Pablo Capuzzi, Flavia Gómez Albarracín y Marcos Trevisán. Por haber mostrado una excelente predisposición a la hora de aceptar evaluar mi tesis y por todo el esfuerzo que implica realizar una tarea de este tipo.

Doy gracias a mis amigos de la vida Julian Varela, Diego Di Leonforte, Lisandro Jiménez, Nahuel Liniers, Sebastián Torres, Sebastián Martínez y Fabricio Fernández. Quiero agradecer especialmente a mi gran amigo Nahuel Fenzel por haberme alentado desde el primer momento. Por haber estado siempre presente y haber compartido una innumerable cantidad de encuentros que sirvieron para charlar de nuestras vidas, reinos, e incluso ayudarnos a mejorar como personas.

A mi amiga y colega Belén Areal, por todos los consejos de la vida profesional y haberme ayudado a conseguir trabajo en un momento más que necesario.

A mis amigos docentes, Mariano Piedrabuena y Horacio Salomone. Por los buenos momentos compartidos dentro y fuera del aula.

A mis amigos Nacho Sallaberry y Hernán Martinelli. Su compañía fue invaluable, nuestras conversaciones fueron únicas (tanto en persona como el grupo de Whatshapp que tenemos). Si bien tuvimos miles de momentos lindos, quiero agradecerles especialmente por el ánimo y la fuerza que me dieron durante los meses de cuarentena y por esas llamadas por Zoom en donde nos poníamos al día con todo.

A mis suegros, Osvaldo y Graciela. Por ser tan buenos conmigo y por esas charlas súper interesantes que tenemos cuando nos vemos. Siempre mostraron interés genuino por el avance de mi doctorado y mi desarrollo como persona. Ellos saben del esfuerzo que implica hacer un posgrado y no dudaron en ayudarme cada vez que lo necesité.

Quiero agradecer a mis hermanos Magui y Patri. A Magui por todas esas charlas sobre nuestras carreras y nuestras vidas que me levantan el ánimo y me dan energía para salir adelante y a Patri, que hace unos años me ayudó a programar códigos de procesamiento de datos en C++ que todavía hoy sigo usando.

Agradezco a mi tía Meme que estuvo siempre atenta y estoy seguro que sus oraciones ayudaron a que todo esto salga adelante.

A mi abuela Ada. No me alcanzan las palabras para agradecerle por todo lo que hizo por mí. Por esos almuerzos llenos de amor (y comidas ricas) en su casa. Sin duda es una de las personas más importantes en mi vida. También quiero agradecer a mi abuelo Abel, que fue el mejor abuelo que un nieto puede tener.

Aprovecho esta oportunidad que me da la tesis para decirle a mis papás las cosas lindas que nunca les digo en persona. A mi mamá, Lili y a mi papá, Marce. Este doctorado se debe a ellos. Ellos me alentaron a que hiciera el doctorado aun luego de haber perdido la chance de iniciar la beca un año antes. Yo había tirado la toalla, pero por suerte insistieron. Fueron mi soporte emocional (y económico) durante mis años de estudio universitario. Les agradezco que desde muy chico me hayan inculcado el amor por el conocimiento. Tengo una curiosidad insaciable que se la debo a ellos. Me siento un afortunado de que sean mis padres y espero que si algún día me toca ser padre a mí, poder ser tan bueno como ustedes. ¡Los quiero mucho!

Por último, quiero agradecerle profundamente a mi novia Ana. Por haberme ayudado, escuchado, aconsejado (y soportado) durante estos años de mucho trabajo. Lo que Ana hizo por mí durante todos estos años fue una muestra de amor enorme. Me ayudó con el proofreading y con la estética de los gráficos entre otras tantas cosas. Ana hizo que esta tesis sea mejor, que mis papers sean mejores y que mis charlas sean mejores. Habría que darle un doctorado honorífico por toda la colaboración. Pero más allá del apoyo concreto que siempre me dio, quiero agradecerle por ser una compañera de vida maravillosa. Me siento muy agradecido por haberla conocido, de compartir mi vida junto a ella y que tengamos un proyecto de vida juntos. ¡Te amo Anica!

Índice general

1. Introducción	10
1.1. Contexto general	10
1.2. Abordaje científico	12
1.3. Estructura de la tesis	13
2. El modelo de fuerza social	14
2.1. Introducción	14
2.2. Modelo de fuerza social	15
2.2.1. Las variantes del modelo	15
2.2.2. La formulación matemática del modelo	16
2.3. Los logros del modelo	19
2.3.1. El efecto “ <i>faster-is-slower</i> ”	19
2.3.2. Los <i>blocking clusters</i>	20
2.3.3. Obstáculos para mejorar las evacuaciones	21
2.4. Conclusiones	22
3. Efectos del parámetro de rigidez en la dinámica peatonal	23
3.1. Introducción	23
3.2. Recinto tipo <i>bottleneck</i>	24
3.2.1. Efectos en la dinámica	24
3.2.2. Análisis de la multitud	25
3.3. Recinto tipo pasillo	30

3.3.1.	Análisis de la multitud	30
3.3.2.	Efectos en la dinámica	33
3.4.	Conclusiones	35
4.	Calibración de parámetros	36
4.1.	Introducción	36
4.2.	Mediciones empíricas	38
4.3.	Testeo	40
4.4.	Calibración	43
4.5.	Conclusiones	45
5.	Vestíbulos abiertos	47
5.1.	Introducción	47
5.2.	Aclaraciones preliminares	49
5.3.	Vestíbulo de 2 puertas	49
5.4.	Vestíbulo de 3 puertas	57
5.5.	Conclusiones	61
6.	Vestíbulos cerrados	62
6.1.	Introducción	62
6.2.	Recintos explorados	63
6.3.	Aclaraciones preliminares	64
6.4.	Vestíbulo 1-puerta	65
6.5.	Vestíbulo 2-puertas	68
6.6.	La presión	72
6.7.	Comparación: vestíbulo abierto vs. vestíbulo cerrado	77
6.8.	Conclusiones	78

7. Conclusiones y perspectivas	79
7.1. Perspectivas a mediano plazo	81
7.2. Perspectivas a largo plazo	82
Apéndices	84
Apéndice A. Simulaciones numéricas	86
A.1. Simulaciones numéricas del Capítulo 3	86
A.2. Simulaciones numéricas del Capítulo 4	87
A.3. Algoritmo evolutivo	88
A.3.1. Pasos del algoritmo	88
A.4. Simulaciones numéricas del Capítulo 5	89
A.4.1. Robustez de resultados	90
A.5. Simulaciones numéricas del Capítulo 6	90
A.6. Identificación de <i>blocking clusters</i>	92
Apéndice B. Re-examinación del rol de la fricción	93
Apéndice C. Multitudes más grandes	96
Apéndice D. ¿Qué es el pánico?	99
Bibliografía	101

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto general

La organización mundial de la salud define a los eventos multitudinarios como la concentración de personas en un lugar específico, para un determinado propósito, durante un período de tiempo determinado [1]. En las últimas décadas ha habido un incremento sustancial de la población urbana en todo el mundo. Esto trajo aparejado un aumento en la frecuencia de eventos multitudinarios de todo tipo, así como un aumento en la cantidad de personas involucradas en dichos eventos [2].

Los eventos multitudinarios pueden ocurrir de forma espontánea o planificada. Entre los primeros podemos mencionar eventos de rutina como las aglomeraciones en estaciones de tren en horas pico. Los eventos planificados son organizados previamente como por ejemplo los recitales de música, los eventos deportivos y las peregrinaciones religiosas.

Reunir a las personas tiene muchos beneficios sociales y económicos. De todas formas, estas situaciones no están exentas de riesgos para las personas que participan de las mismas. La congregación de individuos aumenta la probabilidad de contagio de enfermedades transmisibles como el COVID o la influenza [3]. También se ha demostrado que aumentan la tasa de hechos delictivos como robos. Pero el peligro mayor es el riesgo de que se produzcan estampidas humanas.

Las estampidas humanas son movimientos direccionados realizados por un grupo de personas. Existen dos tipos de estampidas, las que están motivadas por la percepción de peligro y las que están motivadas por el deseo de obtener algo gratificante [4, 5]. Las evacuaciones de emergencia son situaciones en donde una multitud debe abandonar el lugar donde se encuentra. Si bien no todas las evacuaciones de emergencia se producen de forma impetuosa, existen casos en donde la evacuación se produce en estampida.

Las estampidas son hechos extremadamente peligrosos que ocasionan tragedias. Son la principal causa de mortalidad en los eventos multitudinarios [6]. Hay dos escenarios que llevan a la muerte de los individuos [7, 8]. El primero es la muerte luego de tropezarse. En este caso, la gente que cae no puede volver a ponerse de pie. Los caídos mueren por la percusión de los pisoteos o por el aplastamiento producido por otros individuos que caen encima de ellos. El otro escenario es el de la muerte “de a pie” [8]. En estas situaciones la densidad es extrema y el movimiento es casi imposible. Las mayores presiones las soportan los individuos que se encuentran cerca de las paredes, una puerta cerrada o una valla. En este caso, la muerte suele ser por asfixia

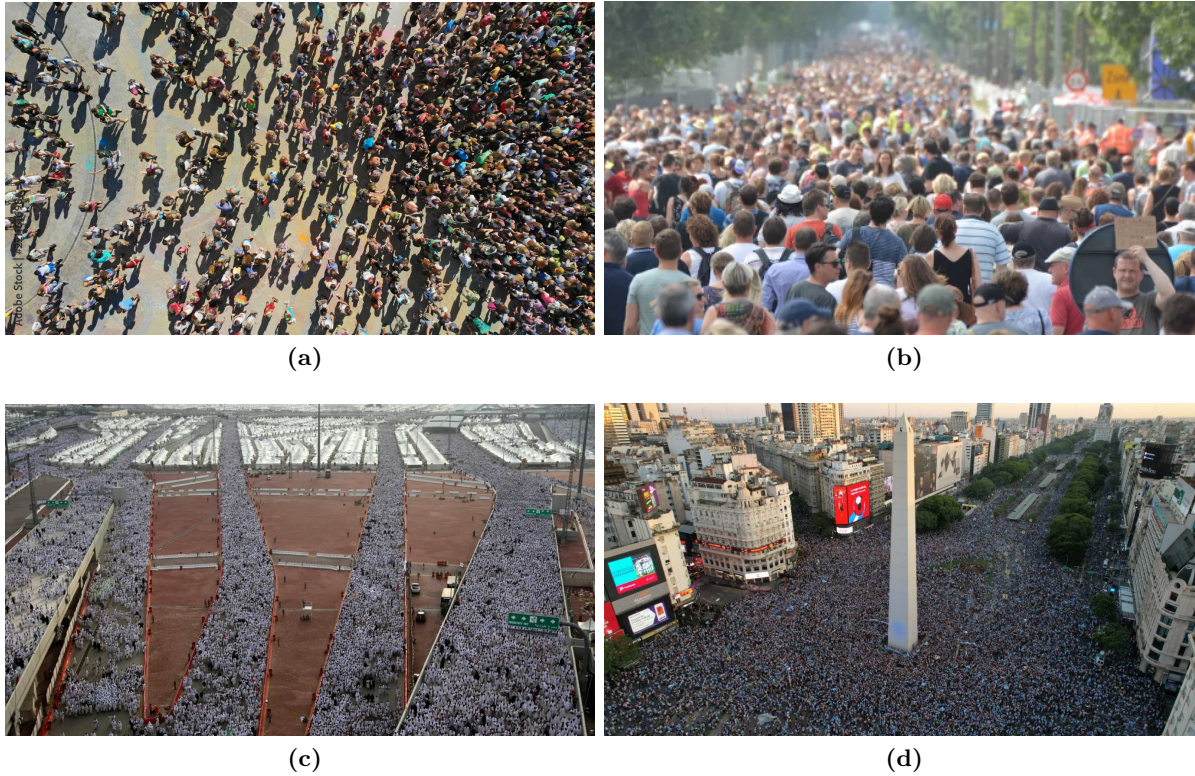


Figura 1.1: (a) Fotografía aérea de un evento multitudinario. (b) Evento multitudinario en Berlín (Alemania). (c) Peregrinación a la gran mezquita de La Meca (Arabia Saudita). (d) Celebración multitudinaria por el triunfo de la Copa del Mundo (Argentina).

traumática [9, 10] (la imposibilidad de respirar debido a la compresión de la caja torácica por la alta presión).

Existen múltiples causas que dan origen a las estampidas humanas [5]. Entre ellas podemos mencionar terremotos [11], incendios [12], atentados terrorista [13] y el uso de gas lacrimógeno [14]. También pueden ser causadas por rumores y falsas alarmas [15] (sobre todo de atentados terrorista). Otro motivo que ocasiona estampidas humanas son los estímulos que son incorrectamente percibidos como amenazas. Por ejemplo, ruidos fuertes que parecen explosiones o disparos [16, 17]. Lo paradójico de las estampidas es que pueden ocasionar más heridos y muertos que el motivo por el cual se produce la estampida.

Un concepto fundamental que debe tenerse en cuenta en este tipo de hechos es el concepto de pánico. El pánico esta definido como el miedo intenso que hace que uno o más individuos deseen escapar del lugar donde se encuentran lo más rápido posible [18]. En el apéndice D brindamos una explicación completa de este concepto.

Lamentablemente la cantidad de tragedias ha aumentado considerablemente en los últimos años. Desde 1980 hasta el 2012 se reportaron más de 10000 muertes y 22000 heridos por estampidas humanas [19]. Cabe destacar que se estima que el número de heridos es mucho mayor porque es muy difícil llevar un registro exhaustivo de todos los heridos luego de un hecho tan caótico y conmovedor como lo son estas tragedias.

Las tragedias por estampidas fatales ocurren en todo el mundo. En particular, en Argentina recordamos la tragedia de la Puerta 12 [20] donde murieron 71 personas y la tragedia de Cromañón [21] que ocasionó la muerte de 194 personas. Las fatalidades más recientes en otros países

son la Estampida del monte Meron [22] (en Israel), donde murieron 45 personas aplastadas y la Estampida de Halloween de Seúl [23] donde hubo 156 muertes.

Instituciones en todo el mundo intentan dar respuesta a este tipo de catástrofes para evitar que ocurran nuevamente. Luego de tragedias ocasionadas por estampidas se han creado legislaciones como la ley N° 2553 que establece un parámetro de criticidad para clasificar actividades como más o menos riesgosas según una serie de características [24]. Esta ley fue sancionada por la legislatura de la Ciudad de Buenos Aires luego de la Tragedia de Cromañón. De igual manera, luego de la Tragedia de Hillsborough en Inglaterra, el Gobierno del Reino Unido elaboró el Informe Taylor [25]. Dicho reporte contiene recomendaciones para aumentar la seguridad en estadios de fútbol. Incluso organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud se han involucrado en la gestión de riesgos para la salud durante los eventos multitudinarios [1].

Por otro lado, la comunidad científica también aborda esta problemática con el fin de tener una mayor comprensión de lo que ocurre y ofrecer soluciones basadas en evidencia. En la siguiente sección describimos cómo la ciencia se ocupa de este tema.

1.2. Abordaje científico

Muchas disciplinas del conocimiento estudian las estampidas humanas desde distintas perspectivas. Entre ellas podemos mencionar a la psicología social [26], la ingeniería [27], la arquitectura [28] y la física [29]. La física estudia este tema a través de tres enfoques diferentes [30]. Estos son el enfoque experimental, el enfoque empírico y el enfoque teórico.

- **Enfoque experimental:** se vale de experimentos controlados para recrear evacuaciones en estado de pánico. Permite que los investigadores tenga control sobre la situación analizada. Sin embargo, hacer experimentos que realmente reproduzcan evacuaciones de emergencia es muy difícil por razones éticas (es inapropiado que un experimento induzca pánico real en los voluntarios involucrados).
- **Enfoque empírico:** debido al creciente número de videos disponibles en internet, en los últimos años se hizo posible estudiar las evacuaciones de emergencia desde un enfoque empírico. Es decir, usando filmaciones o datos de la vida real donde los individuos no saben que están siendo filmados o al menos no saben que luego serán objeto de investigación. Estas filmaciones permiten ver fenómenos que antes eran documentados a partir de entrevistas post-facto. El enfoque empírico le da al investigador la posibilidad de estudiar el sistema con un mayor grado de realismo. Sin embargo, la limitación de este enfoque es que todavía no hay mucha información documentada sobre evacuaciones de emergencia de la vida real.
- **Enfoque teórico:** se vale de modelos matemáticos para estudiar el tema. Los modelos son representaciones abstractas que permiten describir matemáticamente determinados fenómenos de la realidad (en este caso las estampidas humanas). Este enfoque permite elaborar predicciones, ensayar situaciones hipotéticas y brindar explicaciones a los fenómenos propios de la dinámica peatonal. Se utilizan simulaciones computacionales para tener una representación detallada de fenómenos como las evacuaciones en estado de pánico. Este enfoque no tiene que lidiar con las dificultades de los enfoques experimental y empírico. Sin embargo, los modelos teóricos pueden producir resultados poco realistas si no se validan o calibran adecuadamente. En el próximo capítulo profundizaremos más sobre el

modelado teórico y, en particular, describiremos el modelo que utilizamos a lo largo de esta tesis (el modelo de fuerza social).

1.3. Estructura de la tesis

En esta tesis investigaremos las evacuaciones en estado de pánico desde un enfoque teórico y empírico. Realizamos simulaciones computacionales basándonos en el modelo de fuerza social. En primer lugar exploramos y calibramos ciertos parámetros del modelo valiéndonos de datos empíricos. Luego, proponemos un diseño arquitectónico capaz de mejorar sustancialmente las evacuaciones de emergencia.

La estructura de la tesis es la siguiente. En el capítulo 2 presentamos el modelo de fuerza social. Este modelo es utilizado a lo largo de toda la tesis y su formulación matemática será objeto de referencia en los subsiguientes capítulos. En el capítulo 3 discutimos los efectos del parámetro de rigidez del cuerpo humano en el contexto de la dinámica peatonal. Este parámetro cumple un rol fundamental en los análisis de presión que se desarrollan en los últimos capítulos.

En el capítulo 4 ponemos a prueba el modelo de fuerza social y los parámetros usualmente utilizados en la literatura. Además, calibramos dos parámetros del modelo para que éste sea capaz de reproducir datos empíricos de una estampida humana.

En los siguientes dos capítulos (capítulo 5 y 6) proponemos una solución basada en arquitectura (la incorporación de vestíbulos) para que las evacuaciones de emergencia sean más rápidas y más seguras. El capítulo 5 está destinado a explorar vestíbulos abiertos mientras que el capítulo 6 está destinado a los vestíbulos cerrados.

En el capítulo 7 enumeramos las conclusiones de todo el trabajo y además proponemos futuras líneas de investigación para el mediano plazo y el largo plazo.

Esta tesis tiene cuatro apéndices. En el primer apéndice (Apéndice A) se detallan cómo fueron realizadas las simulaciones numéricas y los algoritmos utilizados. En el segundo apéndice (Apéndice B) examinamos los efectos del coeficiente de fricción en situaciones de alta densidad.

El tercer apéndice (Apéndice C) presenta resultados de flujo de evacuación para multitudes más grandes de las que son tratadas en el cuerpo de la tesis. Por último, destinamos un apéndice (Apéndice D) a definir el termino “pánico” en el contexto de la dinámica peatonal.

Capítulo 2

El modelo de fuerza social

En este capítulo presentamos al modelo que usamos para estudiar evacuaciones en estado de pánico. Primero mostramos los modelos utilizados en la literatura para estudiar la dinámica peatonal en general. Luego nos enfocamos en la formulación matemática del modelo de fuerza social (la versión “escape de pánico”). Por último, enumeramos los logros del modelo con respecto a los efectos que es capaz de reproducir, así también como las predicciones para mejorar las evacuaciones de emergencia.

2.1. Introducción

El movimiento de las personas atrajo la atención de la comunidad científica desde hace muchos años. Los primeros estudios se le atribuyen a Henderson en la década del 70’ [31]. Estas investigaciones comparaban mediciones del movimiento de peatones con las ecuaciones de fluidos de Navier-Stokes. Sin embargo, el estudio de la dinámica peatonal tomó un impulso formidable a finales de la década del 90’ debido al auge de las simulaciones computacionales.

Los modelos de dinámica peatonal se suelen clasificar de la siguiente forma [32]:

- **Discreto vs. continuo:** el tiempo, la posición y la velocidad pueden ser consideradas discretas (como en el caso de los modelos de autómatas celulares y lattice gas) o continuas (como los modelos tipo fluidos).
- **Microscópico vs. macroscópico:** en un modelo microscópico los individuos son representados como agentes independientes. Por otro lado, los modelos macroscópicos utilizan densidades para representar a la multitud. Estos últimos utilizan elementos de volumen donde pueden haber un gran número de personas y se utilizan cantidades promedio en cada elemento de volumen.
- **Basados en reglas vs. basados en fuerzas:** en los modelos basados en reglas los agentes “toman decisiones” basándose en la situación de su entorno, su estado actual y sus objetivos. Estas reglas suelen estar inspiradas en argumentos psicológicos. En cambio, los modelos basados en fuerzas determinan las interacciones entre agentes mediante funciones matemáticas que intervienen en las ecuaciones de movimiento. Hay que destacar que en este tipo de modelos las fuerzas no necesariamente tienen un carácter físico (algunas fuerzas representan comportamientos psicológicos).

- **Determinista vs. estocástico:** en un modelo determinista la dinámica futura queda determinada por la dinámica pasada. En un modelo estocástico existen factores probabilísticos que hacen que el movimiento de los agentes no quede únicamente determinado por su dinámica pasada.

Los primeros intentos por simular la dinámica de multitudes estuvieron enfocados en modelos tipo fluidos. Es decir, modelos continuos, macroscópicos y basados en fuerzas. Si bien estos modelos logran reproducir comportamientos de la multitud a gran escala, fallan a la hora de reproducir fenómenos a escala de unos pocos individuos. Es por eso que este enfoque fue dejado de lado por dos grandes familias de modelos: los autómatas celulares [33, 34] y los modelos de fuerza social [29, 35].

Los autómatas celulares suponen que los agentes se mueven en una grilla (discreta) donde cada individuo ocupa una celda y su movimiento queda determinado por un conjunto de reglas. Por otro lado, los modelos de fuerza social representan a los agentes como unidades independientes que pueden desplazarse en un espacio continuo. Las interacciones quedan mediadas por una serie de fuerzas que representan aspectos físicos y psicológicos.

2.2. Modelo de fuerza social

2.2.1. Las variantes del modelo

Los modelos de fuerza social son una familia de modelos que se utilizan para estudiar el movimiento de personas a escala individual y a escala grupal. Corresponden a las categorías de modelo continuos, microscópicos y basados en fuerzas. Pueden ser deterministas o estocásticos dependiendo del tipo de fuerzas que se incluyan.

En los últimos años surgieron muchas extensiones y variantes de los modelos de fuerza social [36, 37]. De todas formas, estas variantes pueden clasificarse dentro de dos grandes grupos: la llamada “especificación elíptica” [35, 38] y la “especificación circular” [29]. La diferencia entre estas dos especificaciones radica en cómo se modelan a las fuerzas de interacción repulsivas entre pares de individuos.

La especificación elíptica [38] debe su nombre al hecho de que los potenciales de repulsión entre individuos tienen forma de elipse como consecuencia de considerar potenciales repulsivos dependientes de la velocidad. Se utilizan para simular situaciones de baja densidad (pocas personas por unidad de área) y situaciones donde los individuos no están apurados por evacuar un recinto. Por otro lado, en la especificación circular [29], los potenciales de repulsión entre individuos solo dependen de la distancia entre centros de masa. Esto da origen a potenciales radiales con forma de círculos.

En esta tesis trabajamos únicamente con la especificación circular (también conocida como “versión de escape de pánico”). Como el nombre indica, esta versión del modelo fue creada específicamente para simular multitudes evacuando en estado de pánico. La ventaja de este modelo es que posee la cantidad necesaria y suficiente de parámetros que permiten recrear situaciones de extrema complejidad (como eventos masivos, estampidas humanas y evacuaciones de emergencia).

2.2.2. La formulación matemática del modelo

En el modelo de fuerza social los individuos son representados como “discos blandos” en un sistema bidimensional. Estos agentes simulados son partículas autoimpulsadas que están sometidas a una serie de fuerzas que representan aspectos físicos y psicológicos [29]. Cada agente i posee atributos como la masa m_i y el radio R_i . Este último está asociado a la mitad del ancho de hombros de una persona.

El modelo contempla cuatro tipos de fuerzas básicas [29]: fuerza de deseo, fuerza social, fuerza corporal y fuerza de fricción. A continuación detallamos cada una de ellas.

1. **Fuerza de deseo:** es una fuerza de autopropulsión. Modela el hecho que los individuos quieren ir a un lugar determinado a una cierta velocidad cuyo modulo será mayor cuanto mayor sea la ansiedad del individuo. El parámetro $\mathbf{v}_i^d$ marca la dirección y la rapidez a la que quiere moverse el individuo. Este parámetro se denomina velocidad de deseo. La fórmula 2.1 muestra la expresión matemática de la fuerza de deseo,

$$\mathbf{f}_i^d = m_i \frac{\mathbf{v}_i^d - \mathbf{v}_i(t)}{\tau}, \quad (2.1)$$

τ es el tiempo de relajación (asociado a la velocidad de reacción de los individuos) y $\mathbf{v}_i(t)$ es la velocidad que tiene el individuo i a tiempo t . Vale la pena destacar que esta fuerza inyecta energía al sistema.

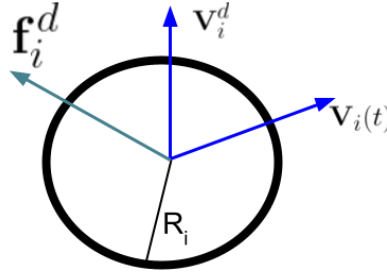


Figura 2.1: Ilustración de un agente simulado con su respectiva fuerza de deseo.

2. **Fuerza social:** esta fuerza modela el hecho que las personas tienden a mantener cierta distancia entre sí. Su expresión matemática se muestra en la siguiente ecuación,

$$\mathbf{f}_{ij}^s = A e^{(R_{ij}-r_{ij})/B} \hat{\mathbf{n}}_{ij}, \quad (2.2)$$

siendo $R_{ij} = R_i + R_j$ donde R_i es el radio de la partícula i . r_{ij} es la distancia entre centros de masa. El parámetro A es una constante con unidades de fuerza, mientras que B es la escala espacial asociada a la fuerza social. Esta fuerza se encuentra en la dirección de separación de los individuos. $\hat{\mathbf{n}}_{ij} = (n_{ij}^x, n_{ij}^y) = (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)/r_{ij}$ es el versor que apunta desde el individuo j hacia el individuo i . Por lo tanto, $\mathbf{f}_{ij}^s$ es la fuerza que ejerce la partícula j sobre la partícula i . Ver Fig. 2.2 para una ilustración de la fuerza social.

3. **Fuerza corporal:** así como la fuerza social representa la repulsión “psicológica” que actúa sobre los individuos, la fuerza corporal representa la repulsión por contacto físico. Mostramos su expresión matemática en la siguiente ecuación,

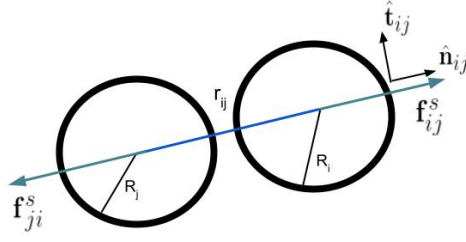


Figura 2.2: Ilustración de dos agentes simulados y la fuerza social que actúa sobre cada uno de ellos. Notar que esta fuerza actúa aun en ausencia de contacto físico entre individuos.

$$\mathbf{f}_{ij}^c = k_n g(R_{ij} - r_{ij}) \hat{\mathbf{n}}_{ij}, \quad (2.3)$$

k_n es una constante de elasticidad que está asociada a la rigidez del cuerpo humano. $g(R_{ij} - r_{ij})$ es una función igual a 0 cuando $R_{ij} < r_{ij}$ y toma el valor del argumento en caso contrario (ver Ec. 2.4). En otras palabras, esta función se anula cuando no hay contacto entre los individuos y es igual al *overlap* ($R_{ij} - r_{ij}$) cuando hay contacto entre ellos. La fuerza corporal actúa como una fuerza de repulsión en la dirección de separación de los individuos $\hat{\mathbf{n}}_{ij}$. El capítulo 3 está destinado a analizar esta fuerza y el rol del parámetro k_n en la dinámica.

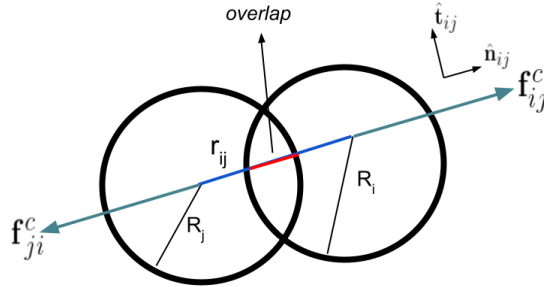


Figura 2.3: Ilustración de dos agentes simulados en contacto. El nivel de contacto queda determinado por el *overlap*. Se muestra la fuerza corporal que actúa sobre cada individuo.

En la Fig.2.3 se muestra un esquema de dos agentes en contacto. Existe cierto *overlap* entre ellos que se lo indica en la figura como un segmento rojo. Este solapamiento ocurre porque $r_{ij} < R_{ij}$. Es decir, la distancia entre centros de masa (r_{ij}) es menor que la suma de sus radios (R_{ij}).

La definición matemática del *overlap* es:

$$overlap = g(R_{ij} - r_{ij}) = \begin{cases} 0 & \text{si } R_{ij} < r_{ij} \\ R_{ij} - r_{ij} & \text{si } R_{ij} \geq r_{ij} \end{cases} \quad (2.4)$$

Esta magnitud cumple un rol importante tanto en la fuerza corporal como en la fuerza de fricción. Además, el *overlap* funciona como un indicativo del nivel de presión que soportan los individuos. Esta idea es explorada y discutida en el capítulo 6.

4. **Fuerza de fricción:** limita el movimiento tangencial relativo. Al igual que la fuerza corporal, la fuerza de fricción solo está presente cuando existe *overlap* entre los individuos.

Matemáticamente, esto se consigue gracias a la función $g(R_{ij} - r_{ij})$. En el apéndice B discutimos los efectos de la fuerza de fricción en situaciones de alta densidad. La expresión matemática de esta fuerza viene dada por

$$\mathbf{f}_{ij}^f = k_t g(R_{ij} - r_{ij})(\Delta \mathbf{V}_{ij} \cdot \hat{\mathbf{t}}_{ij}) \hat{\mathbf{t}}_{ij} \quad (2.5)$$

donde $\hat{\mathbf{t}}_{ij} = (-n_{ij}^y, n_{ij}^x)$ es la dirección tangencial. $\Delta \mathbf{V}_{ij} = (\mathbf{V}_j - \mathbf{V}_i)$ es la velocidad relativa y k_t es una constante de rozamiento. Cabe destacar que la fricción aquí utilizada no se corresponde con la fricción tradicional utilizada en la interacción entre sólidos [39, 40].

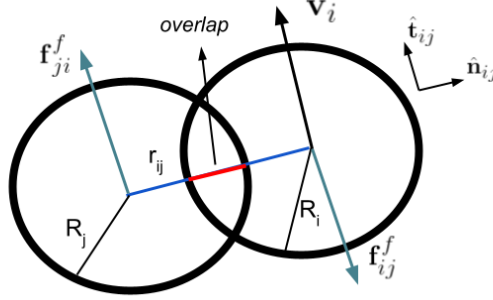


Figura 2.4: Ilustración de dos agentes en contacto. El nivel de contacto queda determinado por el *overlap*. Se muestra la fuerza de fricción que actúa sobre cada individuo.

Las fuerzas de interacción entre individuos se resumen en la siguiente expresión,

$$\mathbf{f}_{ij} = \mathbf{f}_{ij}^s + \mathbf{f}_{ij}^c + \mathbf{f}_{ij}^f, \quad (2.6)$$

Además de la fuerza de deseo $\mathbf{f}_i^d$ y las interacciones individuo-individuo $\mathbf{f}_{ij}$, el modelo contempla interacciones individuo-pared $\mathbf{f}_{iw}$. Las expresiones matemáticas son análogas a las interacciones individuo-individuo pero en las interacciones individuo-pared en lugar de R_{ij} se tiene R_i y en lugar de r_{ij} se tiene r_{iw} (que la distancia entre el individuo i y la pared w).

$$\mathbf{f}_{iw} = \left[A e^{(R_i - r_{iw})/B} + k_n g(R_i - r_{iw}) \right] \hat{\mathbf{n}}_{iw} - k_t g(R_i - r_{iw})(\mathbf{V}_i \cdot \hat{\mathbf{t}}_{iw}) \hat{\mathbf{t}}_{iw} \quad (2.7)$$

Siendo $\hat{\mathbf{n}}_{iw}$ la dirección perpendicular a la pared y $\hat{\mathbf{t}}_{iw}$ la dirección tangencial a la misma. Las fórmulas arriba mencionadas pueden resumirse en la siguiente expresión:

$$\mathbf{f}_{iw} = \mathbf{f}_{iw}^s + \mathbf{f}_{iw}^c + \mathbf{f}_{iw}^f, \quad (2.8)$$

La ecuación de movimiento para el individuo i queda entonces determinada por la ecuación de Newton que se muestra a continuación,

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \mathbf{f}_i^d + \sum_j \mathbf{f}_{ij} + \sum_w \mathbf{f}_{iw}, \quad (2.9)$$

Vale la pena aclarar que todas las fuerzas son aplicadas sobre el centro de masa de los individuos. El torque, y por lo tanto, las rotaciones son excluidas del modelo. Además, cabe destacar que hay que sumar las contribuciones de todos los individuos j y todas las paredes w con las que el individuo i interactúa.

Luego, obtenemos las trayectorias de los individuos integrando numéricamente las ecuaciones de Newton (Ec. 2.9). Para lograr esto utilizamos el algoritmo de Verlet en velocidades [41]. Ver el apéndice A para más detalles.

En esta tesis se discuten los valores de los parámetros, con un enfoque particular en las situaciones de alta ansiedad y alta densidad, donde el contacto físico entre individuos es preponderante. Por lo tanto, nos hemos enfocado en estudiar los parámetros asociados a las fuerzas de contacto, y no hemos abordado los parámetros relacionados con la fuerza social.

En el capítulo 4, presentaremos las modificaciones realizadas a los parámetros k_n y k_t asociados a las fuerzas de contacto. A continuación, mostramos los valores propuestos por Helbing en el paper que dio origen al modelo [29].

$A = 2000 \text{ N}$, $B = 0,08 \text{ m}$, $\tau = 0,5 \text{ s}$, $k_n = 1,2 \times 10^5 \text{ N/m}$, $k_t = 2,4 \times 10^5 \text{ kg/(m.s)}$, $m = 80 \text{ kg}$, $R_i = 0,3 \text{ m}$.

Para mejorar la legibilidad de la tesis, hemos decidido omitir las unidades de medida de k_n y k_t . No obstante, es importante tener en cuenta que las unidades correspondientes de k_n son N/m, mientras que las unidades de k_t son kg/(m.s).

2.3. Los logros del modelo

La dinámica peatonal da lugar a fenómenos emergentes que son el resultado de las interacciones no lineales entre los agentes que componen a la multitud. Entre ellos podemos mencionar a la formación de “carriles” cuando hay flujos de individuos que caminan en sentidos opuestos [42, 43], las olas de *stop-and-go* [44] y el efecto *freezing-by-heating* [45].

El modelo de fuerza social es capaz de reproducir muchos de los fenómenos que se observan en la dinámica peatonal. En esta tesis, nos enfocamos en los fenómenos que se presentan cuando la velocidad de deseo es alta, es decir, cuando los individuos están apurados. Entre ellos destacamos el efecto “*faster-is-slower*” y la formación de “*blocking clusters*”. A continuación, presentamos una breve descripción de estos dos fenómenos.

2.3.1. El efecto “*faster-is-slower*”

En una evacuación los individuos pueden estar apurados por salir del recinto donde se encuentran. Paradójicamente, cuanto más rápido quieran evacuar, más lenta puede ser la evacuación en general. A este efecto se lo conoce como “*faster-is-slower*” [29] y está demostrado experimentalmente [46]. El modelo de fuerza social es capaz de capturar dicho efecto [47].

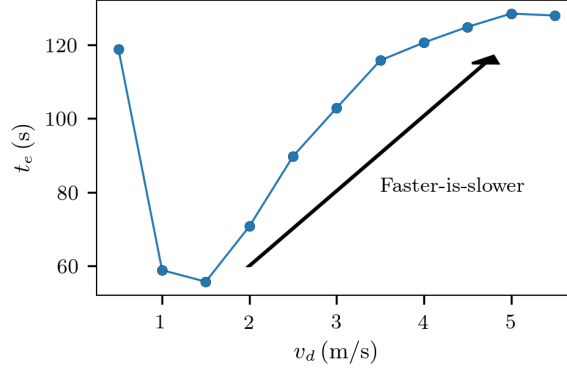


Figura 2.5: Tiempo de evacuación en función de la velocidad de deseo de los individuos. Puede verse el efecto *faster-is-slower* para velocidades de deseo en el rango $v_d \geq 1,5$ m/s. El gráfico corresponde a una simulación de una multitud de 200 peatones evacuando a través de una puerta equivalente al tamaño de dos individuos. El recinto es de $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ y las condiciones iniciales en posición y velocidad fueron aleatorias.

En la Fig. 2.5 mostramos un gráfico de tiempo de evacuación en función de la velocidad de deseo. El gráfico corresponde a una simulación de 200 individuos utilizando el modelo de fuerza social. El tiempo de evacuación está definido como el intervalo de tiempo que tarda el 90 % de los individuos en salir del recinto. La velocidad de deseo es el parámetro del modelo que regula el grado de ansiedad que tienen los individuos. En el gráfico puede verse que aumentar v_d produce un aumento del tiempo de evacuación (para velocidades de deseo en el rango $v_d \geq 1,5$ m/s). En otras palabras, cuanto más ansiosos están los individuos por salir del recinto, más lento evacúan.

2.3.2. Los *blocking clusters*

Un aspecto fundamental que diferencia una evacuación de baja ansiedad respecto de una evacuación de alta ansiedad es la formación de “*blocking clusters*”. Llamamos *blocking cluster* a la estructura de individuos que se forma en torno a una puerta y bloquea momentáneamente el paso a través de la misma [47].

Para definir más precisamente qué es un *blocking cluster* es importante primero definir el concepto de cluster granular [48]. Un cluster granular es el conjunto de individuos tal que por cada miembro i del conjunto existe al menos otro miembro j en contacto con el primero. El cluster granular se define con la siguiente fórmula matemática:

$$C_g : P_i \in C_g \Leftrightarrow \exists j \in C_g / r_{ij} < (R_i + R_j) \quad (2.10)$$

Donde P_i indica el i -ésimo individuo siendo R_i su radio. Es decir, C_g es un conjunto de individuos que interactúa no solo a través de la fuerza social sino también a través de la fuerza de fricción y la fuerza corporal.

Un *blocking cluster* se define entonces como el cluster granular mínimo que se encuentra más cercano a la puerta cuyo primer y último individuo están en contacto con las paredes a ambos lados de la salida.

Los *blocking clusters* suelen tener forma de arco debido a la simetría de la multitud en torno a la puerta. En la Fig. 2.6 mostramos un *blocking cluster* simulado (son los agentes marcados con color rojo). Estas estructuras bloqueantes juegan un rol fundamental a la hora de producirse

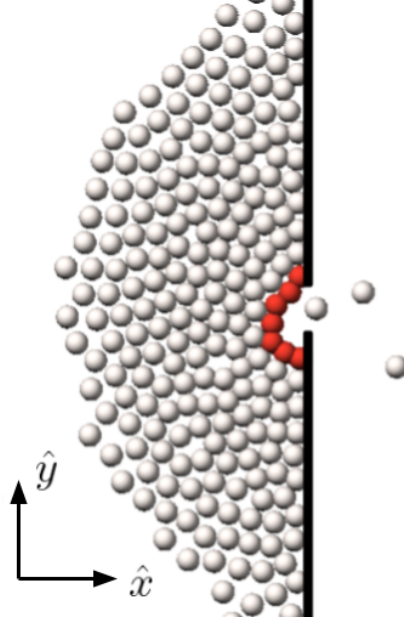


Figura 2.6: Ilustración de una simulación de una multitud evacuando en un recinto tipo *bottleneck*. Los individuos marcados en color rojo representan un *blocking cluster*. El sistema permanece bloqueado por ~ 1 s.

evacuaciones en estado de pánico.

En el enlace de la referencia [49] se muestra un vídeo de la toma del Ministerio de Desarrollo Social donde puede verse un *blocking cluster* cuando los manifestantes ingresan al edificio.

En estos sistemas, los *blocking clusters* dan origen a un flujo “intermitente”. Es por eso que suele usarse la función de supervivencia para caracterizar el bloqueo del sistema [50]. En esta tesis no realizamos dicho análisis y centramos la atención en la probabilidad de formar *blocking clusters*.

2.3.3. Obstáculos para mejorar las evacuaciones

El modelo de fuerza social no solo es capaz de reproducir fenómenos que se observan en la dinámica peatonal. También es capaz de predecir efectos que mejoran las evacuaciones. En este sentido, podemos mencionar la idea de incorporar un obstáculo delante de la puerta de salida para reducir el tiempo de evacuación. Esta idea, que a primera vista resulta anti-intuitiva, fue predicha por el modelo de fuerza social en el paper que dio origen al mismo [29]. Posteriormente se hicieron experimentos que confirmaron dicha predicción [51-53].

En los últimos años, esta idea despertó el interés de muchos investigadores y se convirtió en uno de los temas más discutidos dentro de la dinámica peatonal. Se ha publicado un gran número de papers tanto en el campo teórico [54-56] como en el campo experimental [51-53, 57].

En esta tesis nos basamos en la hipótesis de que un obstáculo delante de una puerta puede mejorar las evacuaciones. Proponemos diseños arquitectónicos innovadores que son capaces de reducir el tiempo de evacuación, así como también aliviar la presión que soportan los individuos. Cabe destacar que los diseños arquitectónicos propuestos en esta tesis poseen un mejor desempeño que las propuestas que se encuentran en la literatura.

2.4. Conclusiones

En este capítulo presentamos al modelo de fuerza social. Primero dimos a conocer una clasificación de los modelos de dinámica peatonal. Luego, hicimos un breve comentario acerca de las variantes del modelo para después pasar a dar una descripción detallada de la formulación matemática del mismo.

Al finalizar el capítulo, mencionamos algunos logros del modelo. Entre ellos destacamos la capacidad de reproducir fenómenos propios de la dinámica peatonal (el efecto *faster-is-slower* y la formación de *blocking clusters*) y la capacidad de predecir mejoras en las evacuaciones (incorporar un obstáculo delante de la puerta).

En los próximos capítulos de la tesis haremos uso del modelo aquí presentado. En primer lugar exploramos los efectos que tiene variar el parámetro k_n , luego ponemos a prueba y calibramos los parámetros del modelo. Finalmente proponemos diseños arquitectónicos capaces de mejorar las evacuaciones de emergencia.

Capítulo 3

Efectos del parámetro de rigidez en la dinámica peatonal

En este capítulo exploramos el parámetro de rigidez k_n del modelo de fuerza social. Estudiamos los efectos de variar este parámetro en dos tipos de recintos diferentes: recintos tipo cuello de botella (“*bottleneck*”) y recintos tipo pasillo. El aumento de k_n produce efectos opuestos en la dinámica dependiendo del recinto en donde se encuentre la multitud. En un recinto tipo *bottleneck*, aumentar k_n produce un aumento de la velocidad media, mientras que en un recinto tipo pasillo sucede lo contrario. El capítulo está dividido en cuatro secciones. En la primera sección introducimos el tema y la motivación. La segunda sección está destinada a explicar los efectos de variar k_n en *bottleneck*, mientras que la tercera sección corresponde al recinto tipo pasillo. Por último, enumeramos las conclusiones parciales de esta etapa de la investigación.

El parámetro k_n se encuentra en la fuerza corporal que se expresa en la siguiente fórmula:

$$\mathbf{f}_{ij}^c = k_n g(R_{ij} - r_{ij}) \hat{\mathbf{n}}_{ij}, \quad (3.1)$$

Este término del modelo de fuerza social fue discutido en el capítulo anterior (ver Ec. 2.3).

3.1. Introducción

En el capítulo anterior presentamos el modelo de fuerza social con sus respectivos parámetros. Los parámetros de la fuerza social (A y B) y el tiempo de reacción de las personas (τ) fueron estimados a partir de mediciones empíricas [29]. Por otro lado, el parámetro k_n es uno de los más relevantes y sin embargo no se le ha prestado la atención suficiente en el marco del modelo de fuerza social.

Recordemos que el parámetro k_n representa el grado de rigidez (o compresibilidad) de los individuos. Este parámetro es relevante porque está vinculado a las presiones que soportan los individuos en situaciones de alta densidad como las que pueden ocurrir en evacuaciones en estado de pánico.

Si bien se han hecho muchas mediciones independientes para determinar este parámetro, aun no existe unanimidad sobre cuál es el valor de dicha magnitud dado el enorme grado de dispersión

en los resultados. En el paper de Neurauter et al. [58] se calculó la rigidez del tórax a partir de datos empíricos que surgen de hacer RCP (resucitación cardiopulmonar) con un instrumento capaz de regular la fuerza que soportan los pacientes [59]. El valor obtenido es $k_n = 4500$ N/m. Si bien la mayoría de las mediciones obtienen resultados que se encuentran en el orden de los miles de N/m [60-62], existen mediciones como las de Stalnaker et al. [63] y las de Melvin et al. [64] que registran valores de hasta 120000 N/m.

La dispersión de valores de k_n y la relevancia que este parámetro tiene respecto a las presiones que soportan los individuos, ameritan una exploración exhaustiva. Estudiamos entonces los efectos de k_n para distintas situaciones de la dinámica peatonal (en recintos tipo *bottleneck* y en recintos tipo pasillo).

Queremos destacar que, así como en este capítulo estudiamos el rol del parámetro k_n , también hemos hecho un estudio del rol del coeficiente de fricción (k_t). Los resultados más relevantes del estudio del parámetro k_t pueden encontrarse en el apéndice B .

3.2. Recinto tipo *bottleneck*

En esta sección presentamos los resultados correspondientes al recinto tipo *bottleneck*. Un recinto tipo *bottleneck* está conformado por una única puerta de salida y dos paredes que delimitan la puerta. Los individuos deben abandonar el recinto atravesando la puerta de salida. En la Fig. 2.6 puede verse una representación esquemática de dicho recinto. En esta sección mostramos las consecuencias en la dinámica de la evacuación al variar el coeficiente k_n . Recordar que este coeficiente está asociado a la rigidez (compresión) del cuerpo humano.

3.2.1. Efectos en la dinámica

La figura 3.1 muestra el tiempo de evacuación en función de la velocidad de deseo de los individuos para diferentes valores de k_n . El tiempo de evacuación se define como el tiempo transcurrido hasta que el 90 % de los peatones abandonaron el recinto.

Las curvas de la figura 3.1 exhiben dos tipos de comportamiento diferentes. Cuando la pendiente es positiva significa que cuanto más rápido intentan salir los peatones (mayor v_d), más tiempo tardan en evacuar. Este es el régimen “*faster-is-slower*” (FIS). Por el contrario, la pendiente negativa corresponde al régimen “*faster-is-faster*” (FIF). En este régimen, cuanto mayor es v_d menor es el tiempo de evacuación.

La figura 3.1 muestra FIF para $v_d \leq 1,5$ m/s en todas las condiciones exploradas. En este rango, el tiempo de evacuación prácticamente no depende de k_n porque el contacto físico entre agentes es mínimo.

Para velocidades de deseo en el rango $v_d \geq 1,5$ m/s, se observa FIF únicamente para el valor de mayor rigidez $k_n = 1,2 \times 10^6$ mientras que para valores menores de k_n se observa FIS.

Más allá de los patrones FIS y FIF, el tiempo de evacuación disminuye para valores crecientes de k_n (dado un valor fijo de v_d). Esto significa que los peatones rígidos evacuan más rápido que los peatones blandos (ver el sentido de la flecha en la figura 3.1). En línea con lo anterior, calculamos la velocidad media de toda la multitud en función de la rigidez k_n .

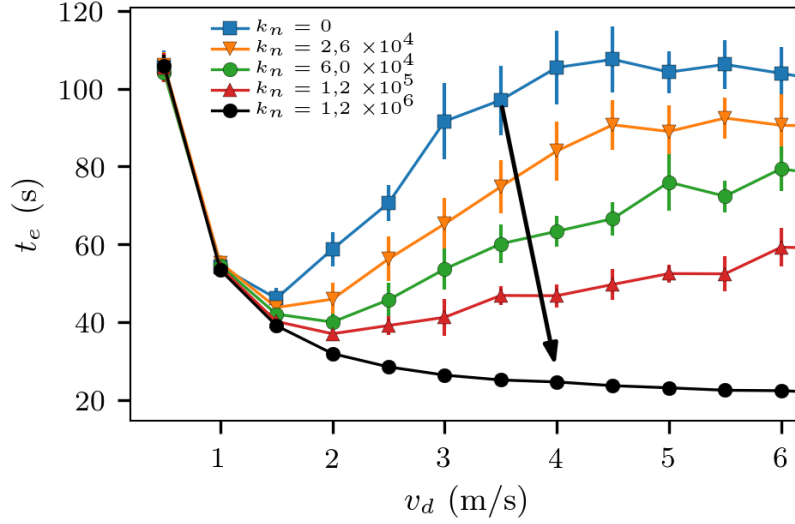


Figura 3.1: Tiempo de evacuación vs. velocidad de deseo. El recinto es un *bottleneck*. La habitación tiene un tamaño de $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$. La puerta tiene un ancho de $0,92 \text{ m}$ (el ancho de dos peatones). Los valores medios se calcularon a partir de 10 procesos de evacuación. 225 peatones se colocaron inicialmente en una red cuadrada con una velocidad inicial aleatoria. Cada proceso finalizó cuando 158 peatones abandonaron la sala. Los diferentes símbolos indican el valor de k_n correspondiente al coeficiente de rigidez. La flecha señala el incremento de k_n (de “blandos” a “rígidos”)

La Fig. 3.2 muestra la velocidad media en la dirección $\hat{x}$ en función de la rigidez (k_n) para tres velocidades de deseo diferentes. La dirección $\hat{x}$ es perpendicular a la puerta de salida (ver Fig. 2.6). La velocidad aumenta con la rigidez en todos los casos. El incremento de velocidad más significativo está en el intervalo $k_n > 10^4$.

3.2.2. Análisis de la multitud

El fenómeno FIF solo se encuentra presente para los individuos más rígidos (con $k_n = 1,2 \times 10^6$), según la Fig. 3.1. Podemos suponer que el nivel de contacto físico entre peatones difiere según la rigidez de los mismos.

Ahora estudiamos los contactos entre los individuos asimilando a la multitud como una red y a los peatones como los nodos de dicha red. Existe un enlace entre dos nodos cualquiera cada vez que dos individuos estén en contacto físico (es decir, $r_{ij} \leq R_{ij}$).

La Fig. 3.3a muestra el grado medio (de la red de contactos) en función de la velocidad de deseo. El grado se define como el número de enlaces que conecta a un dado nodo con cualquier otro nodo. El grado medio es el promedio del grado sobre todos los nodos (peatones) y sobre todo el intervalo de tiempo muestreado.

Todos los individuos que se encuentran en el interior del recinto fueron tenidos en cuenta en el cálculo de grado medio que se muestra en la Fig. 3.3a. También hicimos cálculos excluyendo los bordes externos de la multitud. En términos cualitativos los resultados son equivalentes a los aquí mostrados.

Nótese que el grado medio aumenta con v_d (Fig. 3.3a). Esto expresa el hecho de que los valores más altos de v_d producen densidades más altas, lo que obliga a los individuos a aumentar el nivel contacto físico. Para un v_d dado, el grado medio se reduce a medida que aumenta el valor

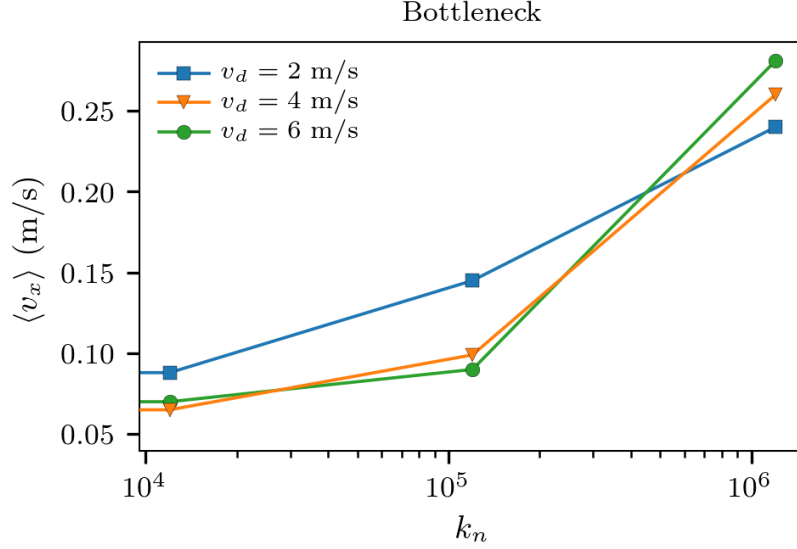


Figura 3.2: Velocidad media en la dirección $\hat{x}$ en función del nivel de rigidez k_n para diferentes velocidades de deseo (ver la correspondiente v_d en la leyenda). Los datos corresponden a un *bottleneck* con reingreso de peatones. El promedio se tomó cada cinco segundos desde que la multitud llega al estado estacionario ($t = 20$ s) hasta el final de la simulación ($t = 1000$ s).

de k_n (ver la flecha en el gráfico). El grado medio disminuye notablemente para el valor más alto de k_n .

En la Fig. 3.3b se tiene una visión más detallada de la dinámica de contacto. Se muestra el *overlap* entre individuos en función de v_d . Recordar que el *overlap* es un indicativo de la presión (ver definición formal en la sección 2.2.2). Al igual que el grado medio, el *overlap* es una función creciente con v_d .

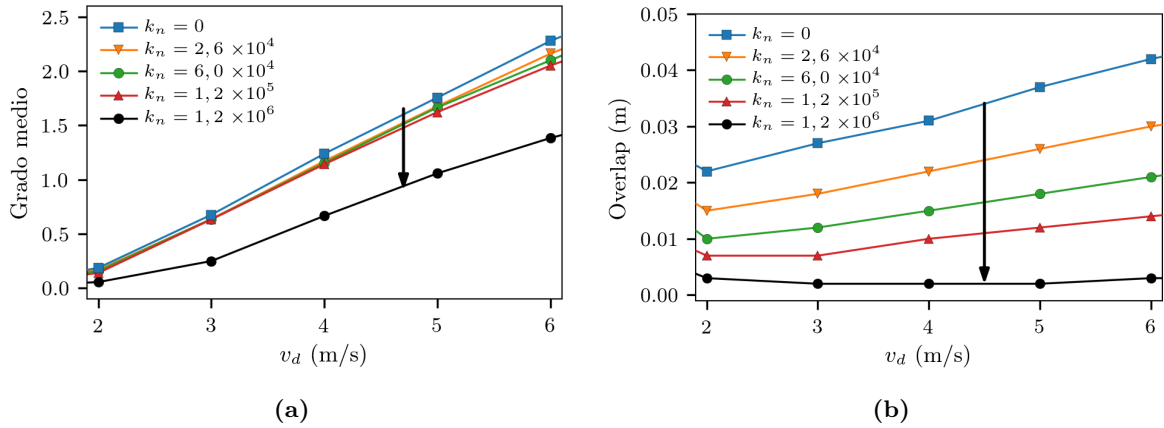


Figura 3.3: (a) Grado medio en función de la velocidad de deseo. (b) *overlap* medio en función de la velocidad de deseo de los peatones. Cada símbolo indica el valor de k_n correspondiente a la fuerza corporal (ver las leyendas). Los datos corresponden a un *bottleneck* con reingreso de peatones. Los valores informados son promedios temporales y sobre todos los individuos. El muestreo se realizó cada cinco segundos una vez que la multitud alcanzó el estado estacionario ($t = 20$ s) hasta el final de la simulación ($t = 1000$ s).

Para una v_d fija, el *overlap* disminuye a medida que aumenta el valor de k_n (ver la flecha en el gráfico). Esto puede explicarse porque la fuerza corporal es una fuerza repulsiva en la dirección normal. Entonces, aumentar la intensidad de dicha fuerza (aumentando k_n) produce una mayor

repulsión entre pares de individuos. Es decir, se produce un menor *overlap* entre ellos. Esto hace que la fricción se reduzca cuando los individuos se vuelven más rígidos (recordar que la fricción depende linealmente con el *overlap* Ec. 2.5).

La reducción de la fricción aparece como la primera causa que explica la disminución del tiempo de evacuación. Tanto la reducción del *overlap* como la reducción del grado medio tienden a disminuir la intensidad de fricción dentro de la multitud.

Como mencionamos arriba, la fuerza corporal tiene un impacto notable en la cantidad de individuos que están en contacto físico (el grado de la red de contactos). Esto se visualiza claramente en la Fig. 3.4, donde se muestran cuatro configuraciones diferentes de la dinámica de evacuación. Las configuraciones representan a 225 peatones que intentan escapar por una puerta. Los colores corresponden al grado de cada nodo (peatón), y las líneas entre peatones representan los contactos entre ellos.

Las cuatro configuraciones corresponden a dos valores diferentes de v_d y dos valores diferentes de k_n . Las figuras 3.4a y 3.4b muestran “snapshots” para $k_n = 0$, a velocidades de deseo 2 m/s y 6 m/s, respectivamente. Las figuras 3.4c y 3.4d muestran situaciones similares, pero para $k_n = 1, 2 \times 10^6$. Como era de esperar, aumentar la velocidad de deseo comprime a la multitud contra la puerta de salida.

Los cuatro snapshots de la Fig. 3.4 exhiben el hecho de que los peatones más rígidos evitan que la multitud se amontone contra la puerta de salida. Nótese también que a $v_d = 6$ m/s, para $k_n = 1, 2 \times 10^6$ hay muchos menos nodos de grados 6 y 5 que para $k_n = 0$.

Además de la fricción, otro aspecto fundamental en la dinámica de una multitud evacuando son los *blocking clusters* (el grupo de individuos que obstruyen la salida). La Fig. 3.5 muestra la probabilidad de formar *blocking clusters* en función de la velocidad de deseo para diferentes valores de k_n . Los *blocking clusters* se vuelven más probables para una velocidad de deseo alta. Eso sucede porque la multitud en la vecindad de la puerta de salida se vuelve más compacta a medida que aumenta v_d .

El hecho más destacable de la Fig. 3.5 es que el aumento de la rigidez reduce la probabilidad de bloqueo (ver la flecha en el gráfico). Se ha demostrado, en trabajos anteriores, que el tiempo de evacuación aumenta con los *blocking clusters* [47]. En resumen, el aumento de la rigidez disminuye la presencia de los *blocking clusters* y, en consecuencia, disminuye el tiempo de evacuación. Esto se plantea como una segunda característica (además de la reducción de la fricción) para disminuir el tiempo total de evacuación.

Podemos resumir esta sección de la siguiente manera. Exploramos el efecto de variar la rigidez del cuerpo humano k_n y la velocidad de deseo v_d en un recinto tipo *bottleneck*. Para $v_d \leq 1,5$ m/s observamos FIF para todos los k_n explorados. Para $v_d > 1,5$ m/s observamos diferentes escenarios dependiendo de k_n . Los peatones blandos alcanzan un patrón de evacuación FIS, mientras que los peatones más rígidos presentan un patrón FIF únicamente.

Además de los efectos FIS y FIF, el parámetro k_n afecta el tiempo de evacuación. Existen dos factores que explican la disminución del tiempo de evacuación al aumentar k_n . El primer factor es la disminución de la fricción (como consecuencia de la disminución del grado medio y el *overlap*). El segundo factor es la disminución en la probabilidad de formar *blocking clusters*, de acuerdo con la Fig. 3.5.

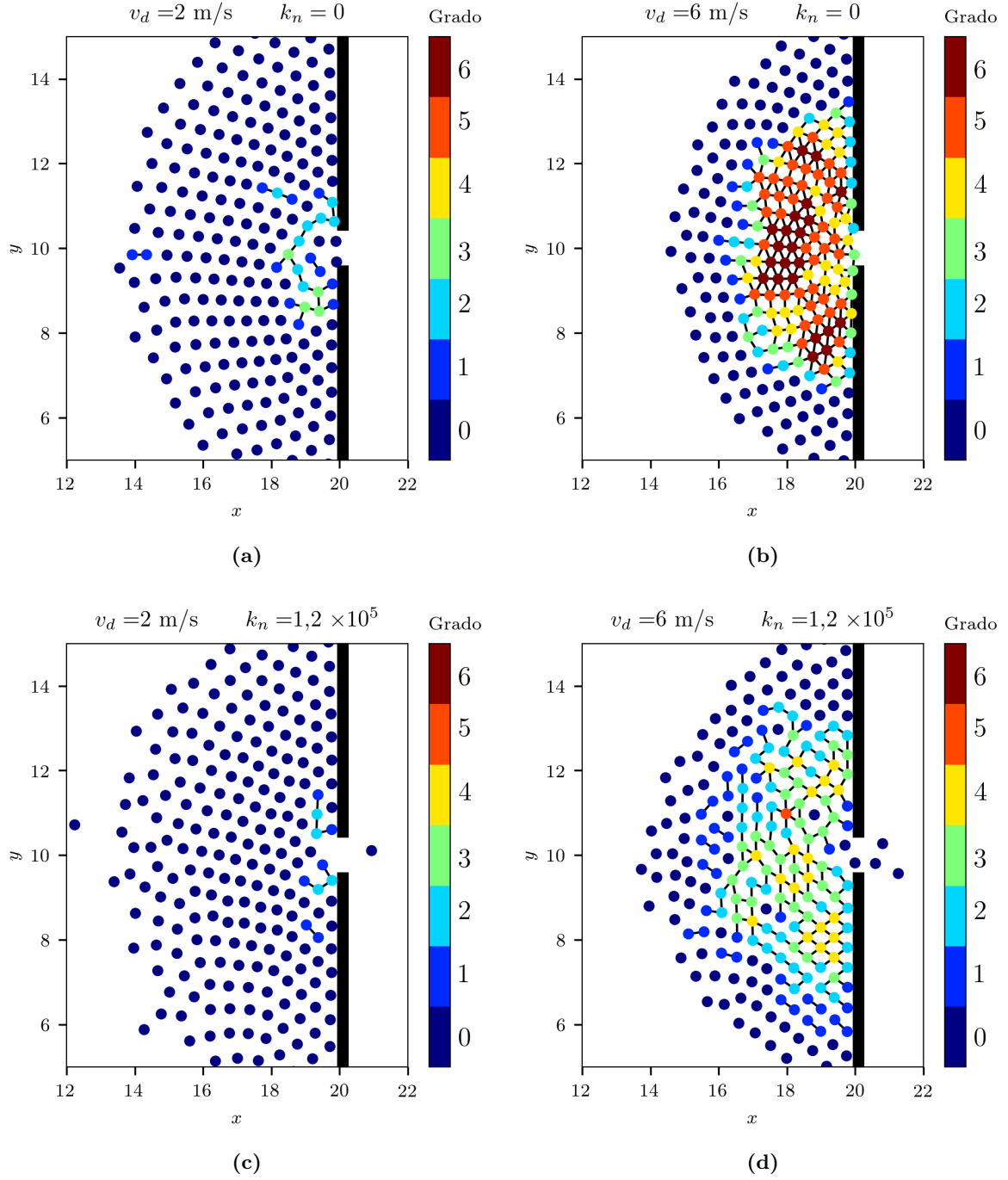


Figura 3.4: Snapshots de las redes de contacto de una evacuación de 225 peatones a través de un *bottleneck*. La puerta se coloca en $(x, y) = (20, 10)$ m, el ancho de la puerta es de 0,92 m (equivalente a dos peatones de diámetro). Las líneas que conectan los nodos (peatones) representan el contacto entre ellos. El color representa el grado (el número de peatones con los que está conectado). (a) y (b) corresponden a una situación sin fuerza corporal ($k_n = 0$) y $v_d = 2$ m/s y $v_d = 6$ m/s, respectivamente. (c) y (d) corresponden a simulaciones con $k_n = 1,2 \times 10^6$ con $v_d = 2$ m/s y $v_d = 6$ m/s respectivamente.

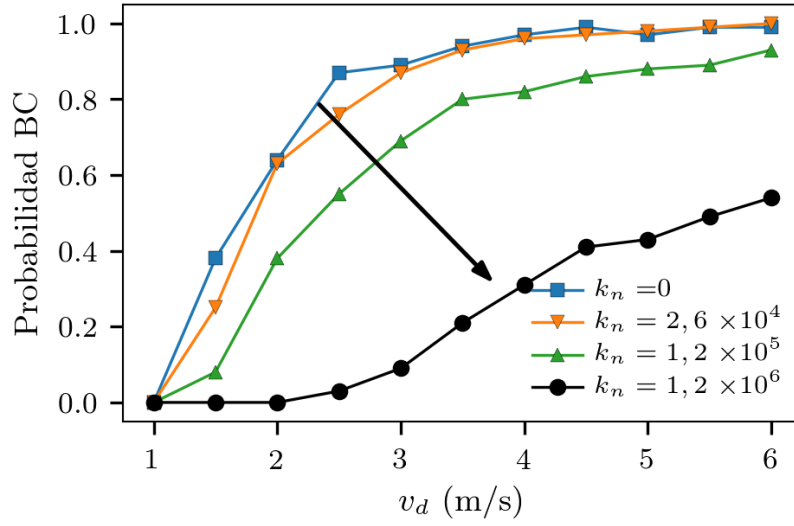


Figura 3.5: Probabilidad de formar *blocking clusters* en función de v_d para diferentes niveles de rigidez k_n (ver leyendas). La probabilidad se calcula como la cantidad de tiempo que un *blocking cluster* está presente dividido el tiempo total de simulación. El gráfico corresponde a un *bottleneck* con 225 peatones con reingreso de individuos. El tiempo de simulación se fijó en $t_f = 1000$ s.

3.3. Recinto tipo pasillo

En esta sección presentamos los resultados correspondientes al recinto tipo pasillo. Mostramos los efectos de variar el coeficiente k_n en la dinámica de la multitud. A lo largo de esta sección mantenemos v_d fijo y variamos la densidad de individuos ρ . En la Fig. 3.6 mostramos una representación esquemática del recinto analizado. La velocidad de deseo de los individuos está en la dirección $\hat{x}$. Para más detalles acerca de las simulaciones ver apéndice A.

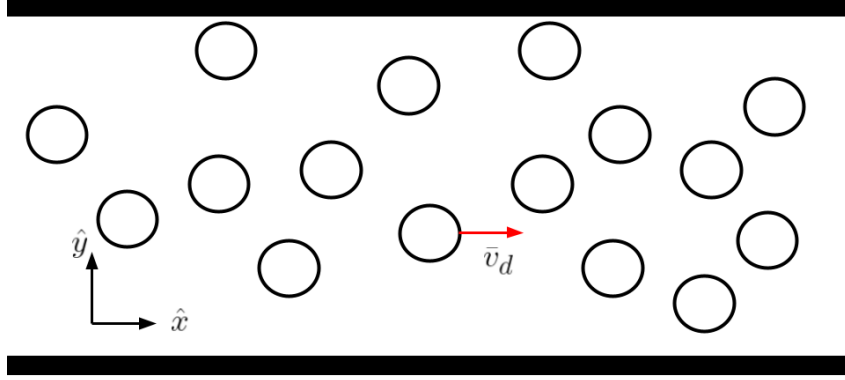


Figura 3.6: Representación esquemática del recinto tipo pasillo. Los círculos representan a los individuos moviéndose de izquierda a derecha. Los rectángulos superior e inferior representan las paredes que delimitan el pasillo.

3.3.1. Análisis de la multitud

Primero calculamos la red de contactos de la misma manera que en el recinto tipo *bottleneck*. La Fig. 3.7a muestra el grado medio en función de la densidad global para diferentes valores de k_n . El grado medio es aproximadamente cero para densidades muy bajas porque la fuerza de repulsión social (Ec.2.2) hace que los peatones no entren en contacto. Cuando la densidad supera los $4,5 \text{ p/m}^2$, algunos peatones comienzan a tocarse entre sí, aumentando el grado medio. A medida que la densidad aumenta, el grado medio se acerca al valor asintótico 6. El grado 6 corresponde a la máxima densidad de empaquetamiento para discos duros idénticos.

En la Fig. 3.7a se muestra una transición hacia la máxima densidad de empaquetamiento. Vale la pena señalar que los peatones “rígidos” exhiben una transición más pronunciada que los peatones “blandos”. Verificamos aún más este fenómeno contando el número de “clusters de tres nodos” presentes en la red (es decir, los “triángulos” por nodo). Se ha reportado que esta magnitud es sensible a la hora de caracterizar la *jamming transition* en un medio granular [65]. Como puede verse en la Fig. 3.7b, los peatones rígidos tienen más triángulos por nodo que los peatones blandos.

En las Fig. 3.8 presentamos las redes de contactos para el recinto tipo pasillo. La Fig. 3.8a corresponde a $k_n = 0$, mientras que la Fig. 3.8b corresponde a $k_n = 1,2 \times 10^5$. La primera muestra una red desordenada (amorfa), mientras que la segunda exhibe una red casi totalmente ordenada.

Llegado este punto vale la pena hacer una comparación de los resultados hasta aquí obtenidos para ambos tipos de recinto. Comparando la Fig. 3.7a (pasillo) con la Fig. 3.3a (*bottleneck*) puede verse que el incremento de k_n produce efectos contrarios según el tipo de recinto. Para

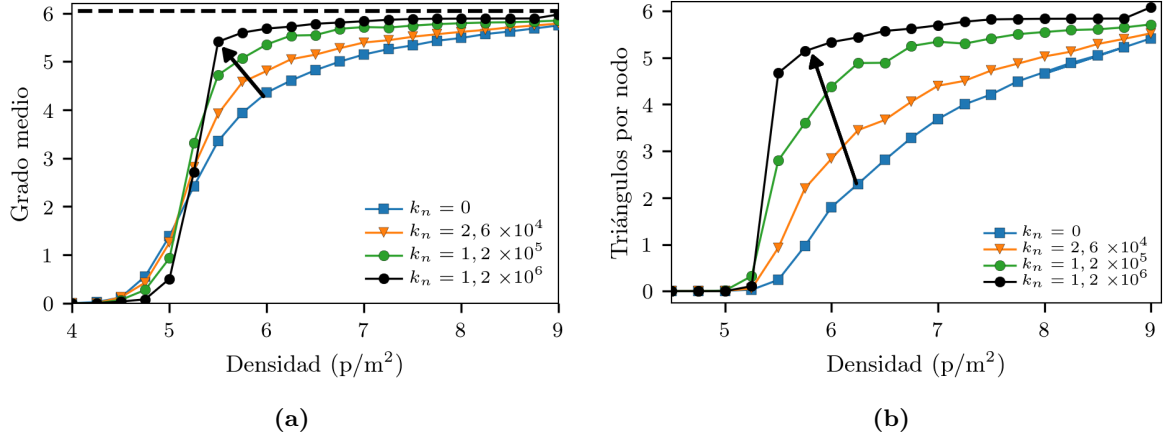


Figura 3.7: (a) Grado medio en función de la densidad global para diferentes valores de k_n . (b) Triángulos por nodo en función de la densidad global. La densidad global es el número total de peatones por unidad de superficie. Los valores medios son promedios sobre todos los peatones a lo largo del tiempo (luego de que el sistema alcanzó el estado estacionario). Las medidas corresponden a un pasillo de $28 \text{ m} \times 22 \text{ m}$ con reingreso de individuos y $v_d = 1 \text{ m/s}$.

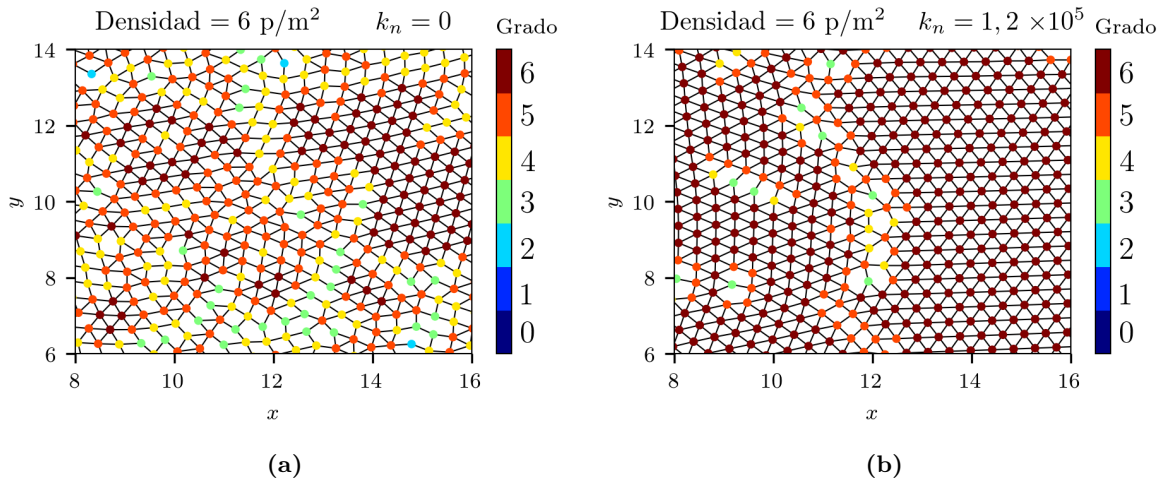


Figura 3.8: Red de contactos de los peatones a lo largo del pasillo en el instante $t = 50 \text{ s}$. La densidad global es $\rho = 6 \text{ p/m}^2$. Las líneas que conectan los nodos (peatones) representan los contactos entre ellos. Los colores representan el grado del nodo (el número de peatones que están en contacto con él/ella). Las dimensiones del pasillo son $28 \text{ m} \times 22 \text{ m}$ con condiciones de contorno periódicas y $v_d = 1 \text{ m/s}$. El número total de peatones fue $N = 3696$ (a) Situación sin fuerza corporal ($k_n = 0$). (b) Situación con $k_n = 1,2 \times 10^5$.

una multitud que se mueve a lo largo de un pasillo el grado medio aumenta al aumentar la rigidez (ver la flecha en Fig. 3.7a). Por el contrario, en el recinto tipo *bottleneck*, el grado medio disminuye al aumentar la rigidez (ver la flecha en Fig. 3.3a).

Siguiendo con la comparación entre *bottleneck* y pasillo, las Figs. 3.4 y 3.8 ilustran las diferencias de conectividad entre ambos recintos. La multitud de la Fig. 3.4 está más conectada cuando los peatones son “blandos” que cuando son “rígidos”. En la Fig. 3.8 ocurre lo contrario. Esta discrepancia está relacionada con las condiciones de contorno. En el recinto tipo pasillo, las paredes laterales actúan como una barrera de confinamiento que obliga a los peatones “rígidos” a aumentar sus contactos. Por el contrario, no existen paredes de confinamiento laterales en la situación del *bottleneck*.

La Fig. 3.9 muestra el *overlap* en función de la densidad para la situación del pasillo. Notar que a bajas densidades los peatones blandos tienen mayor *overlap* que los peatones rígidos (ver flecha). Esto es semejante al comportamiento en un *bottleneck* (Fig. 3.3b). Sin embargo, las curvas de la Fig. 3.3b, no convergen a un mismo valor (como sí ocurre en la Fig. 3.9 donde todas las curvas coinciden para valores de alta densidad). Este fenómeno ocurre debido a las limitaciones de espacio en el pasillo. Estas limitaciones producen valores de *overlap* independientes de k_n .

Los resultados hasta aquí discutidos permiten entender los efectos estructurales en la multitud por el hecho de variar el parámetro k_n . En la siguiente subsección discutiremos los cambios en la dinámica.

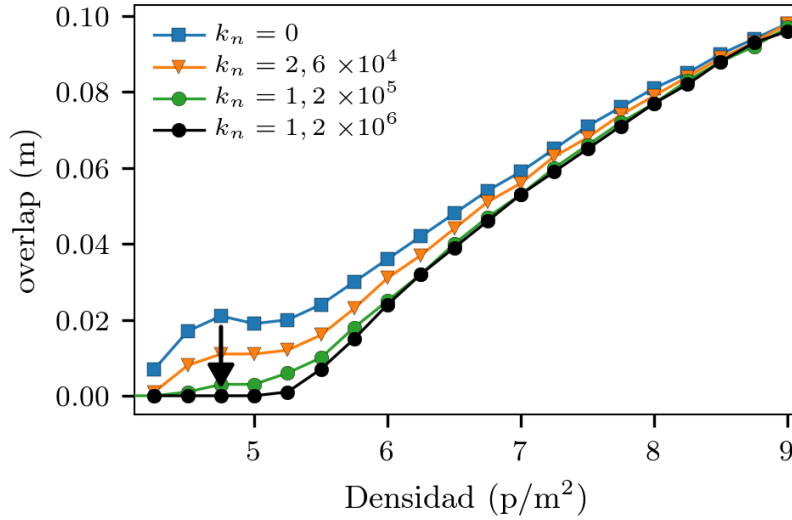


Figura 3.9: *overlap* medio en función de la densidad global. La densidad global es el número total de peatones por unidad de superficie. Los valores medios se promedian en el tiempo y sobre todos los peatones una vez que el sistema alcanzó el estado estacionario. Las mediciones corresponden al recinto tipo pasillo. La velocidad de deseo es $v_d = 1$ m/s.

3.3.2. Efectos en la dinámica

Comenzamos calculando la velocidad media de la multitud en el pasillo. La Fig. 3.10 muestra la velocidad media $\langle v_x \rangle$ (paralela al pasillo) en función de la rigidez para diferentes niveles de densidad global. Este gráfico muestra un patrón constante para $k_n < 10^4$ y una disminución de la velocidad por encima de este umbral. Este comportamiento es opuesto al comportamiento en un *bottleneck* (ver Fig. 3.2).

Si bien estamos comparando la velocidad media en un pasillo y un *bottleneck*, hay que aclarar que en un *bottleneck* el flujo presenta una dinámica muy diferente a la del pasillo. En el *bottleneck*, se observa un flujo más interrumpido, lo que da lugar a valores medios de velocidad más bajos que en el pasillo.

En el recinto tipo pasillo, los valores de rigidez $k_n \geq 10^4$ hacen que el sistema pase a un régimen más “conectado” y, por lo tanto, los peatones reducen sus grados de libertad (desplazándose a la misma velocidad que sus vecinos). Este comportamiento puede concebirse como el paso de un movimiento de “caminata libre” a un movimiento de “caminata restringida” al aumentar la rigidez. Una representación más física asimilaría el primero a un estado de tipo “fluido” y al segundo a un estado de tipo “sólido cristalino”. Cuando la rigidez es muy alta ($k_n = 1,2 \times 10^6$), todos los peatones se desplazan a la misma velocidad. Los peatones que caminan en contacto físico con la pared son los que determinan la velocidad de toda la multitud (esto se discutirá más adelante).

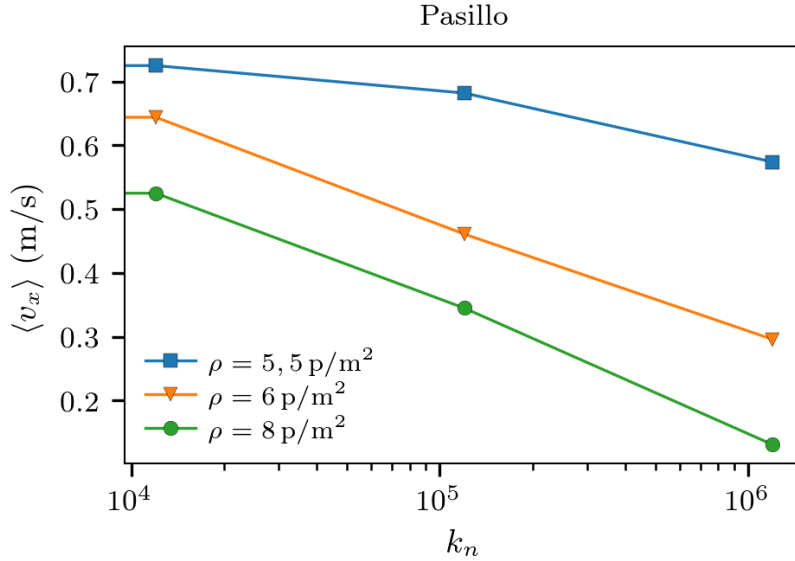


Figura 3.10: Velocidad media en la coordenada longitudinal (v_x) en función de la rigidez k_n para tres densidades globales diferentes (ver leyenda en el gráfico). Las medidas corresponden a un pasillo de $28 \text{ m} \times 22 \text{ m}$ con reingreso de individuos y $v_d = 1 \text{ m/s}$. El promedio se tomó a lo largo del pasillo y a lo largo del tiempo de simulación.

La Fig. 3.11a muestra el perfil de velocidad ($\langle v_x \rangle$) en función de la coordenada transversal del pasillo ‘y’) para diferentes valores de k_n . Para $k_n = 0$, podemos ver un perfil de velocidad de tipo parabólico, lo que significa que la fricción con las paredes reduce la velocidad de los peatones. El perfil de velocidad se asemeja al flujo de Poiseuille (similar a los fluidos newtonianos e incompresibles en un régimen laminar). Este comportamiento también se observó en mediciones empíricas de la dinámica de multitudes [66].

A medida que aumenta k_n , el perfil de velocidad se aplana hasta volverse casi uniforme (ver

Fig. 3.11a para $k_n = 1, 2 \times 10^6$). En este escenario, v_x es mucho más bajo que en el caso de peatones blandos ($k_n = 0$).

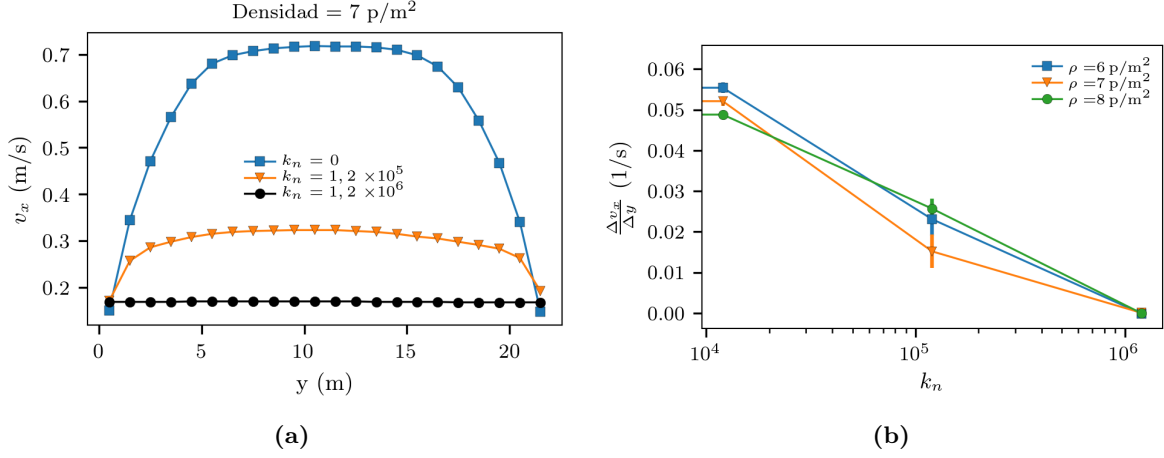


Figura 3.11: (a) Velocidad media en la coordenada ‘x’ en función de la coordenada transversal ‘y’ para tres valores diferentes de rigidez k_n (ver la leyenda). (b) Velocidad de deformación en función del coeficiente de rigidez k_n para tres valores diferentes de densidad global (ver leyenda). Los datos corresponden a un pasillo de 28 m $\times$ 22 m con reingreso de individuos y $v_d = 1$ m/s. La densidad global es $\rho = 7 \text{ p/m}^2$.

A partir de los resultados discutidos arriba, nos damos cuenta de que la multitud se comporta como un sólido para peatones muy rígidos. Esto significa que la multitud no puede “deformarse” fácilmente. En este contexto, la “deformación” significa que algunas partes de la multitud pueden moverse más rápido que otras.

El tensor de velocidad de deformación muestra la tasa de cambio de la deformación de un cuerpo en la vecindad de un punto dado. Consideramos la siguiente definición discreta del tensor de deformación:

$$\frac{\Delta v_x}{\Delta y} = \frac{\langle v_x(\text{centro}) \rangle - \langle v_x(\text{contorno}) \rangle}{|y(\text{centro}) - y(\text{contorno})|} \quad (3.2)$$

Donde $\langle . \rangle$ significa el promedio temporal. Esta definición compara la velocidad de los peatones cerca de la pared (contorno) con respecto a la velocidad de los peatones en el centro del pasillo (centro). Por lo tanto, la tasa de deformación $\Delta v_x / \Delta y$ tiende a cero a medida que la multitud disminuye sus grados de libertad. Este fenómeno se muestra en la Fig. 3.11b donde podemos ver que la velocidad de deformación disminuye para valores altos de k_n .

El comportamiento arriba descrito se explica porque las paredes juegan un papel fundamental que evita que los peatones se separen entre sí. Este efecto se evidencia como un aumento en la conectividad de la red de contactos y el aplanamiento del perfil de velocidad. En el régimen de peatones “rígidos” todos los peatones se desplazan casi a la misma velocidad. Por lo tanto, los peatones que están en contacto con las paredes son los que determinan la velocidad de toda la multitud.

3.4. Conclusiones

Concluimos este capítulo destacando, una vez más, que el parámetro de rigidez k_n produce comportamientos muy diferentes según el tipo de recinto.

En el recinto tipo *bottleneck*, el tiempo de evacuación disminuye (los peatones se mueven más rápido) a medida que aumenta el coeficiente de rigidez (k_n) para todas las velocidades de deseo exploradas. Este fenómeno ocurre por dos motivos. En primer lugar, aumentar k_n disminuye el número de contactos y el *overlap* entre individuos. En consecuencia, esto disminuye la intensidad de fricción entre individuos. En segundo lugar, aumentar k_n reduce la probabilidad de formar *blocking clusters* en la puerta de salida. Ambos efectos conducen a una dinámica de evacuación más rápida.

El recinto tipo pasillo produce el comportamiento opuesto (a mayor rigidez, menor velocidad). La principal diferencia es que, en el pasillo, el movimiento de los peatones está limitado por las paredes laterales (que impiden que la multitud se disperse). En este contexto, a bajos niveles de rigidez, la multitud está desordenada obteniéndose un perfil de velocidad parabólico. En cambio, si el nivel de rigidez es alto, toda la multitud se ordena en una red (como un sólido cristalino). El perfil de velocidad pasa a ser uniforme y con una menor velocidad media (determinada por la interacción con las paredes).

En este capítulo estudiamos los efectos de variar el parámetro k_n . En el próximo capítulo realizamos una calibración del modelo de fuerza social con el fin de determinar un valor específico para el coeficiente k_n . De igual manera, calibraremos el parámetro k_t asociado a la fuerza de fricción. La determinación de estos dos parámetros es un paso fundamental para luego simular evacuaciones en estado de pánico que sean confiables.

Capítulo 4

Calibración de parámetros

En el capítulo anterior nos enfocamos en el parámetro de rigidez del cuerpo humano k_n . En este capítulo realizamos una calibración de los dos parámetros asociados a las fuerzas de contacto. El parámetro k_n y el parámetro k_t (asociado a la fuerza de fricción).

En primer lugar, analizamos un video de la vida real, grabado durante un “*Black Friday*” en la apertura de una tienda (Ekurhuleni, 2017). Este video muestra una estampida humana que se asemeja a una evacuación de emergencia. Medimos el flujo de peatones que ingresan a la tienda y encontramos un valor mayor que el usualmente reportado en condiciones de “laboratorio”.

Luego, comparamos las mediciones empíricas con curvas de evacuación simuladas correspondientes a diferentes conjuntos de parámetros actualmente en uso en la literatura. Los resultados obtenidos sugieren que el conjunto de parámetros correspondientes a calibraciones de experimentos de laboratorio, o situaciones en las que el contacto físico es insignificante, producen simulaciones en las que los agentes evacuan más rápido que en el escenario empírico.

Por último, calibramos los parámetros k_n y k_t . El mejor ajuste que encontramos es capaz replicar cuantitativamente la curva de evacuación empírica. Esta es la primera vez que se calibran los parámetros del modelo a partir de una situación de alta ansiedad y alta densidad de individuos. Es por eso que en los próximos capítulos utilizaremos el conjunto de parámetros obtenido en este capítulo.

4.1. Introducción

La versión “escape de pánico” del modelo de fuerza social (SFM, por sus siglas en inglés) se compone de ocho parámetros: m_i , R_i , τ , v_d , A , B , k_n y k_t . La versión original del modelo fija la masa $m_i = 80$ kg, R_i se distribuyó uniformemente en el intervalo $[0,25 \text{ m}, 0,35 \text{ m}]$. Los parámetros $A = 2000$ N, $B = 0,08$ m toman estos valores para reproducir la distancia mantenida a velocidades de deseo bajas y los flujos medidos a través de *bottlenecks* [67]. $\tau = 0,5$ s se la considera una estimación razonable para el tiempo de aceleración. En cuanto a los parámetros de las fuerzas físicas, $k_n = 1,2 \times 10^5$ y $k_t = 2,4 \times 10^5$, Helbing y colaboradores [29] no dan a conocer las razones para elegir estos valores, pero k_n puede estar relacionado con la investigación de Melving et al. [64] donde miden el parámetro de rigidez del tórax humano.

Si bien el conjunto de parámetros propuesto por Helbing se ha utilizado en muchas investigaciones [47, 56, 68-72], cabe destacar que existen otros conjuntos de parámetros propuestos

por diferentes autores. A continuación describimos cinco papers que hemos seleccionado porque proponen/utilizan diferentes conjuntos de parámetros del modelo.

En el trabajo de Li et al. [11], los autores calibraron los parámetros A , v_d , k_t y k_n a partir de un análisis de video de la vida real. La situación estudiada fue una evacuación de emergencia de un aula de escuela durante el terremoto de Ya'an de 2013 en China [73]. Utilizan un algoritmo de evolución diferencial para ajustar los resultados de la simulación numérica a la curva de evacuación empírica. Esta curva está definida como el número acumulado de individuos evacuados en función del tiempo.

En la investigación realizada por Haghani et al. [74], los autores realizan un análisis de sensibilidad donde encuentran que los parámetros τ y k_t son los más sensibles. En otras palabras, el resultado de la simulación se explica, en gran medida, por el valor de estos parámetros. También realizan un experimento de laboratorio en el que se les pide a los participantes que evacuen un lugar a través de una puerta angosta. Midieron el tiempo de evacuación para tres niveles de ansiedad de los participantes y 6 anchos de puerta diferentes (que varían de 60 cm a 120 cm). Posteriormente, calibraron los parámetros más sensibles, τ y k_t , para ajustarlos a los datos experimentales.

En Ref. [75], Lee et al. realizan un experimento de laboratorio de evacuación variando la proporción de participantes con prisa/sin prisa. Utilizaron la métrica de distancia de Wasserstein para obtener los parámetros A y B que mejor se ajustan a los resultados experimentales. Encontraron muchos conjuntos diferentes de valores A y B dependiendo de la proporción de participantes con prisa/sin prisa. En esta investigación, solo seleccionamos los valores de los parámetros correspondientes al 100 % de individuos apresurados (supuestos como ansiosos).

El trabajo de Frank et al. [54] utiliza una modificación sutil de los parámetros del modelo. Por un lado omiten la fuerza corporal ($k_n = 0$), mientras que por el otro lado fijan los otros parámetros a los mismos valores propuestos por Helbing et al. [29]. El tema de estudio de dicha investigación son las evacuaciones de emergencia ante la presencia de obstáculos [54] (tema que será tratado en los capítulos siguientes).

En la investigación de Tang et al. [76], los autores realizan un *tracking* de peatones en una estación de subterráneo de Beijing. Ajustan los parámetros A y B usando cuadrados mínimos. Obtienen dos conjuntos de valores dependiendo de si los peatones se encuentran en una situación de “aproximación” o de “escape”. El primero indica que los peatones se acercan entre sí, mientras que el segundo significa que los peatones se separan unos de otros. En esta tesis solo estamos interesados en la situación de “escape”.

En la Tabla 4.1 enumeramos los conjuntos de parámetros que fueron seleccionados para esta investigación. Nótese que éstos corresponden al conjunto de parámetros propuestos/utilizados en los trabajos mencionados anteriormente. La lista de parámetros excluye explícitamente la masa, el radio y la velocidad de deseo porque fijamos esos parámetros de acuerdo con un criterio diferente a los propuestos por los autores. En este trabajo fijamos el valor de masa $m = 79,5$ kg, mientras que para el diámetro de los individuos asignamos dos distribuciones gaussianas: $N(37,7 \text{ cm}; 0,09\text{cm})$ para mujeres y $N(41,8 \text{ cm}; 0,1 \text{ cm})$ para hombres.

Hay muchos trabajos similares que no seleccionamos porque calibran otras versiones del modelo (diferentes de la versión de escape de pánico) [38, 77-83]. La Ref. [84] estudia el intervalo de los parámetros A y B que evitan oscilaciones en el modelo. Este artículo fue excluido porque el autor evita explícitamente los choques (y *overlaps*) en su derivación teórica. Esto podría interpretarse como una mejora del modelo en el límite de baja densidad (que no es el caso de las altas densidades reportadas en evacuaciones de emergencia). El trabajo de Bode [85] calibra

Authors	A (N)	B (m)	k_n (Kg s ⁻²)	k_t (Kg m ⁻¹ s ⁻¹)	τ (s)	Refs.
Helbing et al.	2000	0,08	$1,2 \times 10^5$	$2,4 \times 10^5$	0,50	[29]
Li et al.	998	0,08	819	510	0,50	[11]
Haghani et al.	2000*	0,08*	$1,2 \times 10^5$ *	5500	0,12	[74]
Lee et al.	2600	0,012	750	3000	0,50	[75]
Frank et al.	2000	0,08	0	$2,4 \times 10^5$	0,50	[54]
Tang et al.	729**	0,10	$1,2 \times 10^5$ *	$2,4 \times 10^5$ *	0,60	[76]

Tabla 4.1: Conjuntos de parámetros seleccionados para esta investigación. Cada fila corresponde a un conjunto diferente propuesto/utilizado en la literatura. Las celdas con asterisco * corresponden a valores que se completaron con los valores propuestos por Helbing. La celda con ** es $9,18 \times m$ con $m = 79,5\text{kg}$.

la versión de escape de pánico del SFM utilizando los datos experimentales de la Ref. [86]. Sin embargo, este paper no tiene como objetivo proporcionar un conjunto de parámetros, sino promover un método robusto para la calibración del modelo.

4.2. Mediciones empíricas

Todos los análisis de este capítulo fueron hechos a partir del video de una estampida humana. El video está disponible en You Tube [87] y muestra a una multitud de peatones que se apresuran a ingresar a una tienda de Nike durante un *Black Friday*. El evento tuvo lugar en el Centro Comercial East Point en el municipio de Ekurhuleni (Sudáfrica), en el año 2017.

Antes de continuar la lectura de este capítulo recomendamos al lector visualizar el video de la estampida del *Black Friday*. Para visualizar dicho video ir al enlace de la referencia [87].

La Fig. 4.1a muestra el primer fotograma del video. Se ve una multitud de personas esperando que el personal de seguridad les permita ingresar a la tienda. En los fotogramas posteriores (ver el video [87]), se puede ver a una persona con una remera roja y una gorra blanca que logra colarse en la tienda. Inmediatamente después de esto, la multitud comienza a empujar hacia la puerta. El personal de seguridad se corre a un lado y la multitud comienza a entrar masivamente. Recién al final del video, los individuos comienzan a entrar sin prisa.

La capacidad de la puerta se ve superada por la gran cantidad de personas que intentan entrar en la tienda al mismo tiempo. El panel de vidrio colocado en el lado izquierdo de la puerta termina estallado como consecuencia de las altas presiones que soporta. Los individuos exhiben un comportamiento muy competitivo, agresivo y no cooperativo. Presumimos que esta situación podría ser similar a una evacuación de emergencia donde la multitud se encuentra en estado de pánico y el interés propio puede prevalecer sobre el comportamiento racional y colaborativo.

El video está compuesto por 1848 fotogramas. Excluimos los primeros 219 fotogramas y los últimos 458. La primera parte fue excluida porque la multitud está esperando para entrar a la tienda. De manera similar, se excluyó la última parte debido a que la multitud comienza a ingresar de manera mucho más ordenada y no se observa un comportamiento competitivo. El análisis se realizó desde el fotograma 220 hasta el fotograma 1419 (incluidos los valores de borde). Estos son 1200 fotogramas, equivalentes a 40s de tiempo de grabación (ya que la frecuencia de video es de 30 fotogramas/s).

Los 1200 fotogramas seleccionados corresponden a la parte del video donde se observó el comportamiento más competitivo. Recordar que solo nos interesan escenarios como éste, porque la versión de escape de pánico del SFM tiene como objetivo reproducir evacuaciones de emer-

gencia. Los 1200 fotogramas seleccionados se dividieron en “segmentos” de 60 fotogramas cada uno (equivalente a un período de muestreo de $\tau_{samp} = 2$ s). Se eligió este período de muestreo τ_{samp} para que fuera lo suficientemente grande como para contar un número significativo de personas que ingresan a la tienda, y, al mismo tiempo, lo suficientemente pequeño para obtener una cantidad razonable de mediciones.

Una vez que dividimos los 1200 fotogramas seleccionados en 20 segmentos de 60 fotogramas cada uno, procedemos a contar el número de peatones ingresados en cada uno de los 20 segmentos.

La calidad del video es lo suficientemente buena para distinguir a los individuos involucrados en el evento. Por lo tanto, hicimos el conteo manualmente fotograma por fotograma. No se empleó ningún software de seguimiento de peatones, ni corrección por perspectiva, para lograr estas mediciones. En cada fotograma, dibujamos una línea recta que dividía el interior de la tienda del exterior. Como la posición de la cámara de video es casi fija, solo establecimos esa línea divisoria una vez. Luego, contamos cuántos individuos cruzaron la línea en cada segmento del video.

Una vez que contamos cuántos individuos ingresaron a la tienda en cada segmento, pudimos calcular el flujo medio (promedio) y el número acumulado de evacuados en función del tiempo (curva de evacuación).

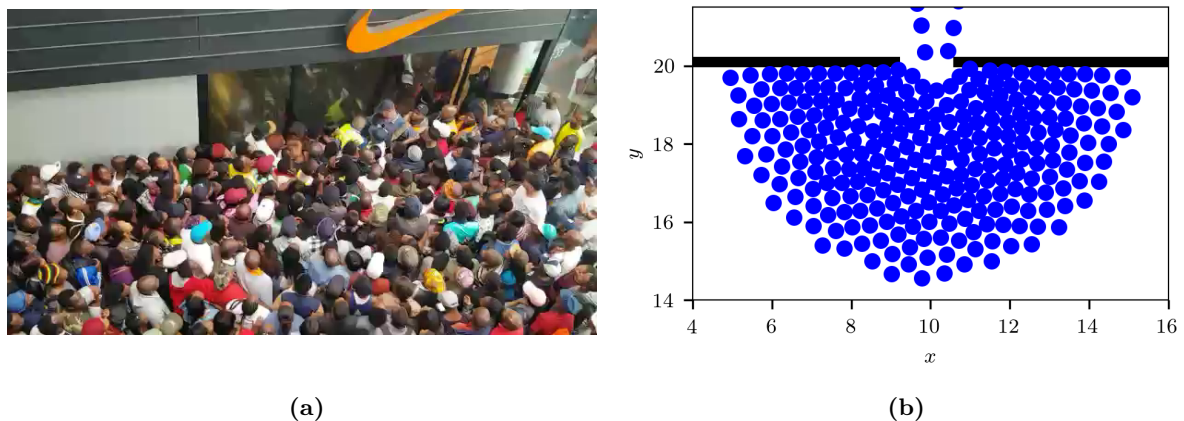


Figura 4.1: (a) Primer fotograma del video analizado. Una gran multitud de peatones está cerca de la entrada de la tienda. La multitud está esperando que el personal de seguridad abra la puerta. (b) Imagen de las simulaciones numéricas realizadas. Estas simulaciones numéricas recrean la estampida del *Black Friday*.

4.3. Testeo

En la sección anterior, describimos el procedimiento de análisis de video para obtener las mediciones empíricas. Usando estos datos, pudimos graficar la curva de evacuación empírica, que es la cantidad acumulada de personas que ingresan a la tienda en función del tiempo. En esta sección, presentamos y discutimos los resultados empíricos, y los comparamos con el resultado de simulaciones numéricas.

La curva de evacuación empírica es una función monótonamente creciente (ver la curva negra en la Fig. 4.2). No existen intervalos de tiempo en los que el proceso de evacuación empírico se detenga por completo, al menos para la frecuencia de muestreo empleada en esta investigación ($\tau_{samp} = 2$ s). Es posible que un tiempo de muestreo, τ_{samp} , más chico sea capaz de capturar el mecanismo de *stop-and-go* producido por los *blocking clusters* en la puerta de salida [88].

El flujo medio de peatones que ingresan a la tienda es $\langle J \rangle = 6,7 \pm 0,8$ p/s. Este valor de flujo es más alto que otras mediciones experimentales donde no se permite que las personas se lastimen entre sí [43, 86, 89-92].

El flujo específico (J_s) se define como el flujo (J) normalizado por el tamaño de la puerta (w). Esta cantidad se utiliza para comparar procesos de evacuación con diferentes tamaños de puerta. El flujo específico medio correspondiente a nuestra medición es: $\langle J_s \rangle = 4,1 \pm 0,5$ p/m.s (suponiendo un ancho de puerta de 1,6 m). Hasta donde sabemos, solo el flujo específico informado en las Refs. [91, 93] es comparable al nuestro. Sin embargo, el flujo específico de las Refs. [91, 93] corresponde a puertas mucho más angostas ($w \leq 0,75$ m) que el tamaño de puerta estimado de la tienda Nike ($w = 1,6$ m). Cabe mencionar que algunas investigaciones han reportado que las puertas angostas producen un incremento moderado en el flujo específico [43], mientras que otras investigaciones concluyen el resultado contrario [94].

La figura 4.2 muestra el número acumulado de peatones que ingresaron a la tienda en función del tiempo (tanto para mediciones empíricas como para simulaciones numéricas). La Fig. 4.2 es una colección de cuatro gráficos, todos ellos incluyen el resultado empírico (mostrado como una curva negra) y los resultados de las simulaciones numéricas (mostrado como curvas de colores). Cada una de estas curvas está asociada a diferentes conjuntos de parámetros (correspondientes a los artículos mencionados en la Tabla 4.1). En el apéndice A se presentan los detalles de las simulaciones numéricas.

Cada gráfico de la Fig. 4.2 está asociado a una velocidad de deseo diferente en el intervalo $2 \text{ m/s} \leq v_d \leq 5 \text{ m/s}$. Los resultados numéricos de las Figs. 4.2a y 4.2b corresponden a $v_d = 2 \text{ m/s}$ y $v_d = 3 \text{ m/s}$, mientras que los resultados numéricos de las Figs. 4.2c y 4.2d corresponden a $v_d = 4 \text{ m/s}$ y $v_d = 5 \text{ m/s}$, respectivamente. Asignamos la misma velocidad de deseo a cada agente simulado desde el comienzo de la simulación hasta que el agente simulado logra ingresar a la tienda.

El tiempo de evacuación t_e se define como el tiempo que tardan los peatones en evacuar un determinado lugar. Si bien el video analizado no es una evacuación, tratamos al tiempo de ingreso al local como un tiempo de evacuación. Por lo tanto, el tiempo de evacuación para las mediciones empíricas es $t_e = 40$ s.

Como mencionamos en el capítulo 2, *faster-is-slower* es un fenómeno que ocurre cuando al aumentar la velocidad de deseo v_d aumenta el tiempo de evacuación. *faster-is-faster* es el efecto opuesto; es decir, cuanto mayor sea el valor de v_d , menor será el tiempo de evacuación. Dentro de este marco, podemos distinguir dos categorías de curvas de evacuación: las curvas que exhiben

faster-is-faster (Lee, Li, Haghani) y las curvas que exhiben *faster-is-slower* (Frank, Tang). Las curvas correspondientes a los parámetros propuestos por Helbing et al. no muestran ninguno de estos efectos de manera significativa.

Los conjuntos de parámetros propuestos por Frank et al. y Tang et al. producen un leve *faster-is-slower*. Son los conjuntos de parámetros que producen el mejor acuerdo con los datos empíricos. Nótese que los tiempos de evacuación (es decir, el tiempo correspondiente a la última medición) superan el tiempo de evacuación de Helbing et al. (para cualquiera de las velocidades de deseo exploradas). En el caso de Frank et al. esta diferencia se puede explicar porque el coeficiente de la fuerza corporal es $k_n = 0$. Como se discutió en el capítulo anterior, esto produce un mayor *overlap* entre los peatones, lo que finalmente conduce a un incremento en la fricción [95].

En el caso de los parámetros propuestos por Tang et al. es más difícil compararlos con los de Helbing porque se modifican tres parámetros (A , B y τ). Sin embargo, el valor de A se reduce y el valor de B aumenta. Estos cambios tienden a disminuir la repulsión de la fuerza social, lo que conduce a un incremento efectivo del *overlap* (y la fuerza de fricción). Esto es análogo a la disminución de k_n establecida por Frank et al.

Como mencionamos antes, los parámetros propuestos por Haghani, Lee y Li producen el efecto *faster-is-faster* (ver flechas de la Fig.4.2a). Los tres producen tiempos de evacuación por debajo de las mediciones empíricas (y también por debajo del tiempo de evacuación correspondiente a Helbing). Esto se verifica para cualquiera de las velocidades de deseo exploradas.

El conjunto de parámetros propuesto por Haghani et al. y Lee et al. surge de hacer calibraciones a partir de experimentos controlados donde los individuos reciben instrucciones explícitas que les impiden tener comportamiento agresivo durante el proceso de evacuación (lo cual conlleva a situaciones que pueden no reflejar completamente la realidad).

Sin embargo, en el evento empírico aquí reportado (*Black Friday*) el comportamiento de los individuos es altamente agresivo y competitivo (ver el video de la Ref. [87]). Esta discrepancia entre las condiciones empíricas y las condiciones de laboratorio parece ser la razón por la cual los conjuntos de parámetros propuestos por Haghani y Lee [74, 75] no producen curvas de evacuación de acuerdo con los datos empíricos analizados en este trabajo.

El conjunto de parámetros propuesto por Li et al. se calibró usando un análisis de video de la vida real (empírico). La situación analizada es una evacuación de emergencia en un aula debida al terremoto de Ya'an de 2013 en China. En el video [73], es posible observar que los estudiantes se apresuran a evacuar el aula. A pesar de esto, el contacto físico entre los estudiantes involucrados es casi insignificante. Este rasgo particular de la evacuación subestimó el valor del coeficiente de fricción k_t , y en consecuencia, el impacto esperado que k_t podría tener en una situación de alta densidad como el *Black Friday* analizado en este trabajo.

Podemos resumir esta sección de la siguiente manera. Reportamos la curva de evacuación empírica (de la estampida del *Black Friday*) y medimos el flujo $\langle J \rangle = 6,7 \pm 0,8$ p/s. También estimamos el flujo específico $\langle J_s \rangle = 4,1 \pm 0,5$ p/m.s. Este es un valor más alto que el flujo reportado por otros autores en condiciones de laboratorio. Además, realizamos simulaciones numéricas para reproducir las condiciones de la estampida del *Black Friday* utilizando diferentes conjuntos de parámetros disponibles en la literatura.

Dividimos los resultados en dos categorías: conjuntos de parámetros que producen *faster-is-slower* (FIS) y *faster-is-faster* (FIF). Los conjuntos de parámetros que producen FIS tienen una mejor concordancia con los datos empíricos (Frank y Tang).

Por otro lado, los conjuntos de parámetros que producen *faster-is-faster* (Lee, Li y Haghani) se calibraron a partir de situaciones empíricas y de laboratorio. En estas situaciones, los peatones involucrados no exhiben un comportamiento agresivo y tampoco un contacto físico significativo. Este hecho subestimó el valor del coeficiente de fricción k_t , dando lugar a curvas de evacuación con tiempos de evacuación inferiores al caso empírico.

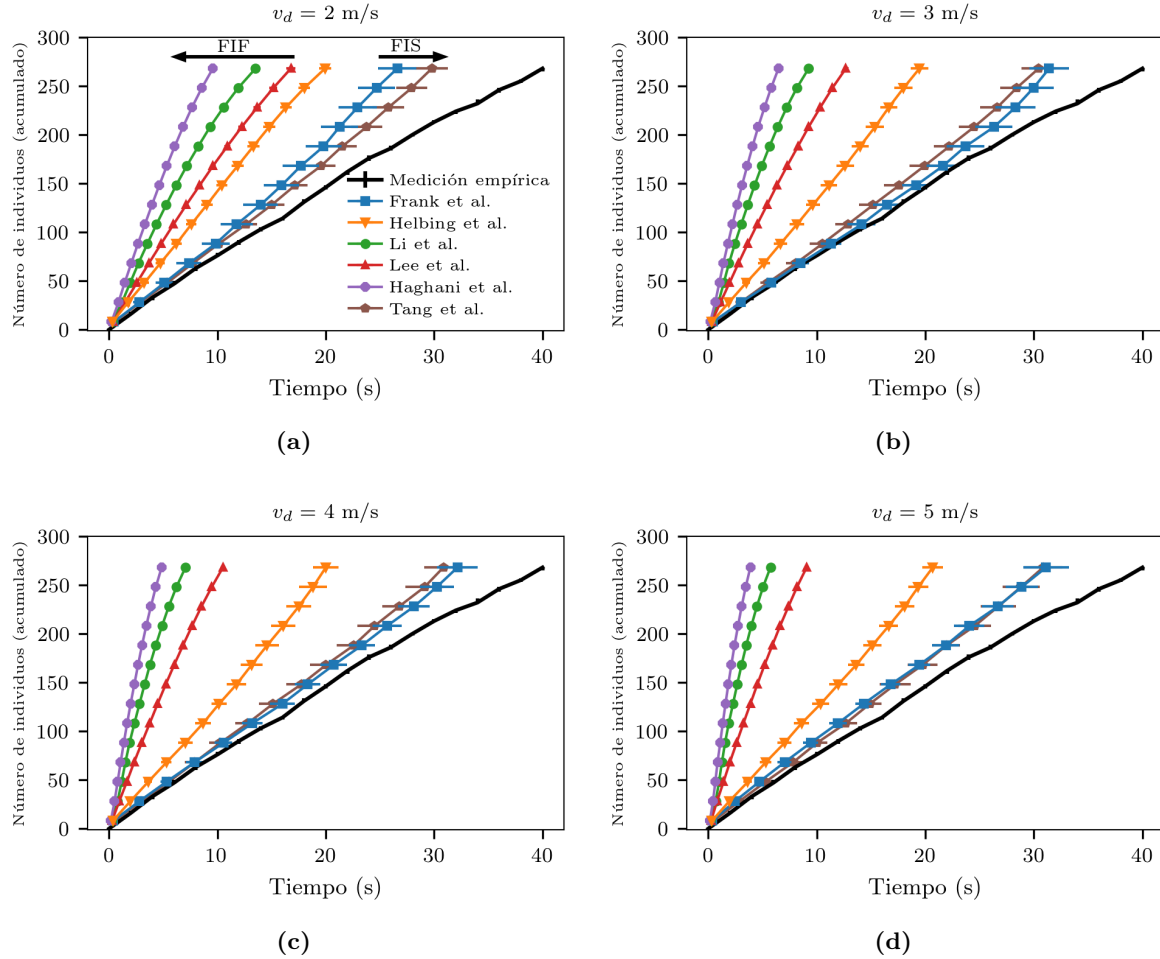


Figura 4.2: Número acumulado de evacuados vs. tiempo (curva de evacuación). La curva negra corresponde a las mediciones empíricas. El resto de las curvas corresponden a resultados de simulación numérica asociados a los parámetros propuestos/utilizados por diferentes autores. La simulación constó de $N = 303$ agentes y finalizó cuando $n = 268$ evacuaron el lugar (para reproducir la situación empírica). El ancho de la puerta es $w = 1,6$ m. La masa ($m = 79,5$ kg) y el ancho de los hombros se establecieron de acuerdo con la Ref. [96]. Se corrieron 50 iteraciones para cada curva simulada, variando las condiciones iniciales (la posición y velocidad de cada agente). Cada una de las cuatro figuras corresponde a diferentes velocidades de deseo (ver el encabezado de cada gráfico). Las flechas en la figura (a) marcan las curvas que experimentan FIS y FIF (a medida que aumenta v_d)

4.4. Calibración

En esta sección presentamos los resultados de la calibración de parámetros. Calibramos los parámetros k_n y k_t que están asociados a las fuerzas físicas: fuerza corporal y fuerza de fricción. La optimización se realizó mediante el algoritmo de Evolución Diferencial (ED) [97], que es una técnica que pertenece a la familia de algoritmos genéticos.

El objetivo del algoritmo ED es optimizar los parámetros del modelo para lograr una curva de evacuación simulada que sea semejante a las mediciones empíricas obtenidas a partir del video del *Black Friday*. El algoritmo requiere una función objetivo (una función que se debe minimizar). Esta función mide en cuánto difiere la curva simulada de la curva empírica. Su definición matemática es la siguiente

$$f(k_n, k_t) = \frac{\sum_i^M |t_i^s(k_n, k_t) - t_i^e|}{M} \quad (4.1)$$

El índice i está asociado a un número fijo de evacuados. Por ejemplo, $i = 0$ corresponde a cero evacuados, mientras que $i = 21$ corresponde a 268 evacuados (tanto en la curva empírica como en la curva simulada). $t_i^s(k_n, k_t)$ es un valor de tiempo correspondiente a la curva de evacuación simulada, t_i^e es un valor de tiempo correspondiente a la curva de evacuación empírica y $M = 21$ es el número total de mediciones. Entonces, para un dado número de individuos evacuados (parametrizado por el índice i), el numerador de la fórmula 4.1 expresa cuánto difieren la simulación de los datos empíricos.

Finalizamos el proceso de optimización cuando el algoritmo alcanza las 100 iteraciones. Hemos visto que la variación de la función objetivo es despreciable para un número de iteraciones menor que 100. Cabe destacar que, una vez alcanzado el estado asintótico se obtienen valores razonablemente bajos de la función objetivo.

Dado que nuestro objetivo es optimizar dos parámetros, establecemos $2 \times 10 = 20$ conjuntos diferentes de valores aleatorios (k_n, k_t) siguiendo las recomendaciones de Storn [97]. Ver la sección A.3 del apéndice A para conocer los detalles de la implementación del algoritmo y los meta-parámetros utilizados.

Las simulaciones numéricas tienen las mismas características que las simulaciones de la sección anterior (número total de evacuados, tamaño de puerta, ancho de hombros, etc.). Los dos únicos parámetros que pretendemos optimizar son el coeficiente de fricción k_t y el parámetro de rigidez del cuerpo k_n . Los demás parámetros se fijaron en los valores propuestos por Helbing et al. [29] (excepto la masa y el radio).

Dados los valores (k_n, k_t), el algoritmo calcula la curva de evacuación a partir del promedio de 50 iteraciones. Luego se compara a la curva simulada con la curva de evacuación empírica (ver Ec. 4.1) para obtener un valor $f(k_n, k_t)$.

La Fig. 4.3 muestra el paisaje de convergencia. El eje horizontal corresponde al parámetro k_n y el eje vertical corresponde al parámetro k_t . La barra de color representa el valor de la función objetivo $f(k_n, k_t)$.

La Fig. 4.3a muestra el paisaje de convergencia para peatones con una velocidad de deseo $v_d = 2$ m/s, mientras que la Fig. 4.3b corresponde a peatones con $v_d = 5$ m/s. Ambos paisajes de convergencia muestran que los valores óptimos de los parámetros k_n y k_t están correlacionados. La línea negra es una guía visual para ver la correlación en el espacio de parámetros. En ambos

gráficos, es posible observar que aumentar el valor de k_n requiere aumentar el parámetro k_t para lograr un valor similar en $f(k_n, k_t)$.

La correlación se puede explicar porque la fuerza de fricción depende del valor de k_t , pero también depende del *overlap* entre los peatones en contacto (ver Ec. 2.5). Como vimos en el capítulo 3, el valor de k_n afecta el valor de *overlap* (y esto en consecuencia afecta a la fricción).

Diferentes combinaciones de los valores de los parámetros pueden producir resultados similares. La línea negra tiene una pendiente diferente según el valor de v_d . El aumento de v_d reduce la pendiente porque v_d afecta directamente al *overlap* entre peatones. Como se vio en el capítulo anterior, cuanto mayor sea v_d , mayor será el *overlap*. En otras palabras, si la velocidad de deseo es mayor, el coeficiente de fricción k_t debe ser menor para lograr los mismos resultados.

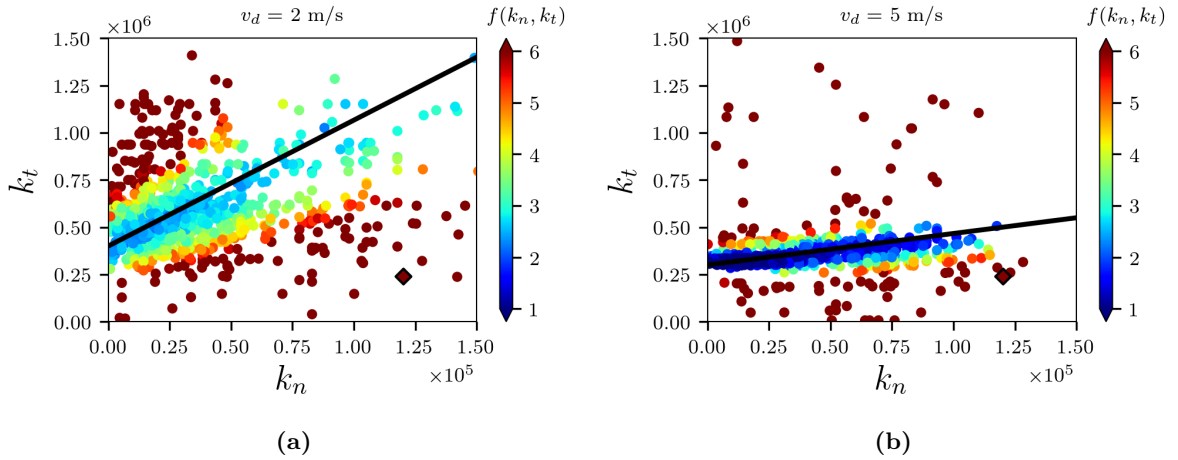


Figura 4.3: Paisaje de convergencia para los parámetros k_n (eje horizontal) y k_t (eje vertical). El resto de parámetros son los mismos que la propuesta de Helbing en la Ref. [29]. La masa ($m = 79,5$ kg) y el ancho de los hombros se establecieron de acuerdo con la Ref. [96]. La escala de colores representa el valor de la función objetivo $f(k_n, k_t)$. El valor de f surge de comparar la simulación numérica con los datos empíricos. Los puntos fueron generados por el algoritmo ED con el fin de minimizar $f(k_n, k_t)$. El punto con forma de diamante representa los parámetros de Helbing et al. [29] (a) Corresponde a agentes simulados con $v_d = 2$ m/s mientras que (b) corresponde a agentes simulados con $v_d = 5$ m/s.

La Fig. 4.4 muestra la curva de evacuación empírica y la curva correspondiente al mejor conjunto de parámetros (línea roja) para $v_d = 5$ m/s. El mejor conjunto de parámetros corresponde a $f(k_n, k_t) = 0,57$ y los parámetros son: $(k_n, k_t) = (0,036 \times 10^5; 3,05 \times 10^5)$. El coeficiente de fricción es superior al valor correspondiente a la propuesta original de Helbing (que es $k_t = 2,4 \times 10^5$). Por otro lado, el coeficiente de fuerza corporal ($k_n = 0,036 \times 10^5$) es menor que el valor original ($k_n = 1,2 \times 10^5$). Sin embargo, cabe destacar que muchas combinaciones de parámetros diferentes pueden producir resultados similares.

Concluimos esta sección enfatizando que, mediante un algoritmo de Evolución Diferencial hallamos el conjunto de parámetros $(k_n, k_t) = (0,0364 \times 10^5; 3,05 \times 10^5)$ que mejor ajusta los datos empíricos. Este resultado sugiere que el valor de la fricción debe incrementarse respecto al valor original propuesto por Helbing. Esta idea ya había sido enunciada en una de nuestras investigaciones. En el apéndice B mostramos brevemente los principales resultados de dicha investigación.

En este capítulo se estimaron los parámetros de k_n y k_t a través del comportamiento empírico de una multitud en estado de ansiedad. Las calibraciones aquí obtenidas corresponden a valores medios (o efectivos) del conjunto de individuos. También enfatizamos que el valor de k_n que

se obtiene del ajuste se encuentra en el orden de magnitud de la mayoría de las mediciones empíricas de la rigidez del tórax y las costillas del cuerpo humano [58, 98, 99].

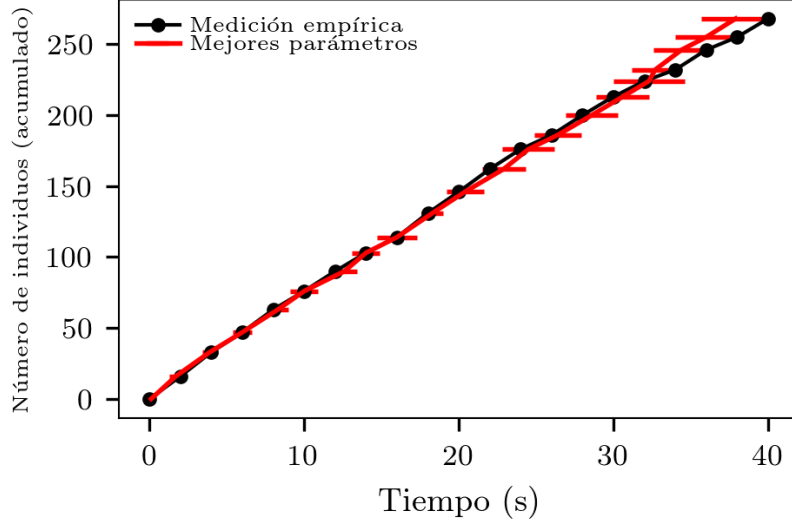


Figura 4.4: Número acumulado de evacuados en función del tiempo (curva de evacuación). La línea negra corresponde a las mediciones empíricas, mientras que la línea roja corresponde al resultado de la simulación numérica que mejor reproduce los datos empíricos. La velocidad de deseo es $v_d = 5$ m/s. Los parámetros que mejor ajustan son $(k_n, k_t) = (0,0364 \times 10^5; 3,05 \times 10^5)$. El resto de los parámetros son iguales a los propuestos por Helbing [29]. La masa ($m = 79,5$ kg) y el ancho de los hombros se fijaron de acuerdo con la Ref. [96]

4.5. Conclusiones

La versión de escape de pánico del modelo de fuerza social ha sido ampliamente utilizada en la dinámica peatonal. El propósito del modelo es estudiar las evacuaciones de emergencia en estado de pánico. Hemos analizado un video de la vida real (de una estampida humana) que se asemeja a una evacuación de emergencia y, por lo tanto, resulta adecuado para testear y optimizar los parámetros del modelo.

Medimos el flujo de la estampida del *Black Friday* ($\langle J \rangle = 6,7 \pm 0,8$ p/s) y encontramos que es más alto que las mediciones de flujo reportadas en la mayoría de los estudios experimentales. Argumentamos que esta discrepancia está relacionada con el hecho de que, en los experimentos controlados, los participantes no tienen una actitud suficientemente competitiva (debido a consideraciones de seguridad). En cambio, en la situación de la vida real analizada en este trabajo, es posible observar un alto nivel de competitividad y agresión.

Hicimos simulaciones numéricas que recrean la estampida del *Black Friday*. Utilizamos diferentes conjuntos de parámetros que fueron previamente propuestos/utilizados en la literatura. Los conjuntos de parámetros calibrados a partir de experimentos controlados en laboratorio, o situaciones en las que el contacto físico es insignificante produjeron simulaciones que muestran un fuerte desacuerdo con nuestras mediciones empíricas. Estos conjuntos de parámetros producen agentes simulados que evacuan demasiado rápido. Pensamos que, si bien esas calibraciones ajustan bien a las situaciones analizadas en sus respectivas investigaciones, no son adecuadas para analizar situaciones de alta ansiedad, como la estampida del *Black Friday*, porque estas calibraciones subestiman la contribución de la fricción.

Los conjuntos de parámetros de Frank y Tang [54, 76] muestran una mejor concordancia con

los resultados empíricos. De todas formas, estos parámetros no reproducen completamente la curva de evacuación empírica (como sí lo hace la calibración aquí presentada).

Implementamos un algoritmo de Evolución Diferencial para obtener mejores valores de los parámetros k_n y k_t . El criterio de optimización fue minimizar la diferencia entre la curva de evacuación simulada y la curva de evacuación empírica. Los valores que producen el mejor ajuste son: $(k_n, k_t) = (0,0364 \times 10^5; 3,05 \times 10^5)$. Estos valores reproducen el comportamiento cualitativo y cuantitativo de la medición empírica. También encontramos que k_n y k_t están correlacionados en el paisaje de convergencia. La consecuencia de esto es que existen múltiples combinaciones de k_n y k_t que producen resultados semejantes (en cuanto a la optimización).

Destacamos que las fuerzas físicas (fricción y fuerza corporal) son un factor crítico en la reproducción de evacuaciones de emergencia donde los peatones están sometidos a condiciones de alta densidad y alta ansiedad. Por lo tanto, sugerimos calibrar los parámetros del modelo utilizando evacuaciones de emergencia de la vida real o situaciones similares (como la estampida del *Black Friday* analizada en esta tesis). Los resultados obtenidos luego de calibrar los parámetros, indican que el coeficiente de fricción k_t puede estar subestimado en la literatura.

Creemos que, en los próximos años, surgirá un número creciente de videos como el que analizamos en este capítulo. Situaciones como los *Black Friday*, recitales masivos y las estampidas humanas se documentan y publican con mayor frecuencia en Internet. Estos datos, junto con las técnicas de visión artificial, contribuirán al estudio de la dinámica peatonal.

Como mencionamos en el capítulo 1, el abordaje empírico es un aspecto fundamental en el estudio de la dinámica peatonal. Esperamos que futuras investigaciones basadas en análisis de video de la vida real mejoren los modelos teóricos destinados a simular evacuaciones de emergencia.

Capítulo 5

Vestíbulos abiertos

Los capítulos anteriores se basaron en explorar determinados parámetros del modelo (k_n, k_t) y encontrar un conjunto de valores para dichos parámetros que sean capaces de reproducir datos empíricos. A partir de este capítulo utilizamos los parámetros calibrados en el capítulo anterior.

En este capítulo y el que sigue exploramos diferentes diseños arquitectónicos capaces de mejorar las evacuaciones de emergencia. En particular, en este capítulo estudiamos las evacuaciones en presencia de “vestíbulos abiertos”. Llamamos “vestíbulo” a la habitación inmediata a la puerta de salida. Decimos que un vestíbulo es abierto cuando está compuesto por uno o más paneles finitos que lo delimitan. Por otro lado, decimos que un vestíbulo es cerrado si las paredes que lo delimitan son tan grandes como el tamaño del recinto.

5.1. Introducción

Colocar un obstáculo delante de una puerta de salida puede parecer una mala idea si lo que se pretende es lograr evacuaciones más eficientes. Sin embargo, en los últimos años comenzó a surgir evidencia que sugiere lo contrario. Es decir, bajo ciertas condiciones, los obstáculos pueden reducir el tiempo que una multitud de personas tarda en evacuar. Esta hipótesis novedosa y anti-intuitiva se postuló por primera vez en el mismo paper que dio origen a la versión de escape de pánico del modelo de fuerza social [29]. Desde entonces, se han realizado numerosas investigaciones para explotar al máximo este fenómeno.

Escobar y De la Rosa utilizaron el modelo de fuerza social para simular evacuaciones de peatones [55]. Evaluaron el desempeño de varios diseños arquitectónicos en términos del flujo de evacuación. Informaron de la existencia del “efecto sala de espera”. La sala de espera (también conocida como “vestíbulo” en la jerga de la arquitectura [100]) es el espacio entre los obstáculos y la puerta de salida. Su efecto asociado es la mejora del flujo; siempre que el flujo de entrada a esta sala no supere el de salida.

El primer experimento de evacuación de peatones utilizando un obstáculo con forma de pilar apareció en Ref. [51] (hasta donde tenemos conocimiento). Aunque el número de participantes es pequeño ($N = 20$), los resultados muestran una leve disminución del tiempo de evacuación respecto de la evacuación sin obstáculo. Estos resultados son consistentes con las predicciones de las simulaciones numéricas anteriores.

Frank & Dorso realizaron simulaciones numéricas de evacuaciones usando obstáculos tipo pa-

nel [54]. Muestran que, bajo ciertas condiciones, los obstáculos tipo panel pueden mejorar el desempeño de los obstáculos tipo pilar. También reportan el efecto *clever is not always better*, lo que significa que la evacuación general puede mejorar si los agentes siguen una estrategia no inteligente a la hora de esquivar los obstáculos.

Aunque la mayoría de las investigaciones se enfocaron en estudiar el obstáculo tipo pilar [52, 57, 101-103], el obstáculo con forma de panel parece producir evacuaciones más rápidas y, por lo tanto, eso ha despertado el interés de la comunidad en los últimos años [54, 56, 74, 104]. El primer experimento de laboratorio que utilizó un obstáculo similar a un panel fue realizado por Zhao et al. [105] (hasta donde tenemos conocimiento). A pesar de las limitaciones del experimento, los autores comprueban que el obstáculo tipo panel es capaz de mejorar sustancialmente el rendimiento de evacuación.

En el estudio [56], los autores realizaron una optimización numérica de las dimensiones y la ubicación de obstáculos con forma de panel y obstáculos con forma de pilar. Afirman que los primeros funcionan mejor que los segundos debido a la capacidad de reducir el tiempo de evacuación y la presión entre los peatones. Destacan que estas conclusiones son válidas incluso para un amplio conjunto de parámetros estructurales. Una investigación más reciente realizada por el mismo grupo, confirma experimentalmente que los paneles tienen mejor rendimiento que los pilares [53].

Aunque la mayoría de las investigaciones afirman que el obstáculo tipo panel mejora la evacuación, otros resultados desafían esta afirmación [106]. Por ejemplo, un estudio numérico reciente explora las limitaciones del obstáculo tipo panel cuando los peatones se enfrentan a una situación de visibilidad limitada [104].

Cabe destacar que el rol de los obstáculos no solo se estudia para recintos tipo *bottleneck* (recintos con una única puerta angosta), sino que también se estudia en recintos tipo pasillo. Para una revisión completa de los efectos de los obstáculos en diversos sistemas (incluidos los autómatas celulares [107-110]), consulte Ref. [110]. Cabe mencionar que el interés por el efecto del obstáculo fue más allá del campo de la dinámica peatonal. Este tema también se ha explorado en sistemas de medios granulares y hasta en evacuaciones con animales [111, 112].

Una de las formas más habituales de cuantificar el aforo de una instalación peatonal es mediante el diagrama fundamental. Es decir, la relación flujo-densidad (o relación velocidad-densidad) [113]. El diagrama fundamental exhibe dos regímenes diferentes: el régimen de “flujo libre” (en el que el flujo aumenta a medida que aumenta la densidad), y el régimen “congestionado” (en el que el flujo disminuye a medida que aumenta la densidad). El diagrama fundamental se ha estudiado en muchos contextos, desde condiciones de laboratorio [113-115] hasta situaciones de la vida real [116, 117]. Se pueden encontrar estudios detallados de este tema en Kretz et al. [118] y Cao et al. [119].

El diagrama fundamental en los *bottlenecks* sigue siendo un tema de debate debido a la falta de consenso sobre los regímenes esperados. Nicolas et al. [89], por ejemplo, realizaron un experimento en el que midieron el flujo de evacuación en función de la densidad de peatones cerca de la puerta de salida [89]. Contrariamente a los resultados esperados, reportan un flujo creciente incluso para valores de densidad tan altos como $\rho = 9 \text{ p/m}^2$. Matyus et al. [120] también reportan un flujo creciente en *bottlenecks*.

En Bernardini et al. [121], los autores midieron el diagrama fundamental a partir de videos de una evacuación provocada por un terremoto. Aunque los valores de densidad no excedieron $\rho = 6 \text{ p/m}^2$, encontraron un incremento no monótono en la curva de flujo versus densidad. Por otro lado, los experimentos de laboratorio que aparecen en Daamen et al. [122] exhiben un

plateau en el flujo después de que se alcanza la “capacidad” (el flujo máximo). Sin embargo, otros experimentos de laboratorio en recintos tipo *bottleneck* muestran la disminución típica del flujo que caracteriza el régimen congestionado del diagrama fundamental [94, 123].

La discrepancia entre los resultados de la literatura puede atribuirse a las diferencias en el ancho de la puerta, la dispersión en el nivel de ansiedad de los participantes, y la variación entre las áreas de medición (entre otras razones). Además, el diagrama fundamental es muy sensible a los criterios de medición de flujo (como se analiza en Seyfried et al. [124]).

Otra consideración a tener en cuenta es que, los experimentos controlados no son del todo adecuados para reproducir condiciones de alta ansiedad. Como se discutió en el capítulo anterior, en este tipo de experimentos los participantes no actúan de forma agresiva (por razones éticas). Sin embargo, algunos experimentos han intentado reproducir condiciones extremas de evacuación involucrando a soldados [57, 125].

Vale la pena mencionar que el vínculo entre el diagrama fundamental y las evacuaciones en presencia de obstáculos está casi inexplorado [126]. En esta tesis contribuimos a alcanzar un punto de convergencia entre ambos fenómenos.

5.2. Aclaraciones preliminares

En este capítulo, el coeficiente de fricción de la pared k_w se analiza como un parámetro de simulación relacionado con los siguientes dos aspectos (similares pero no iguales). Uno es la rugosidad microscópica de las paredes proporcionada por el material (madera, ladrillo, vidrio, etc.). El otro aspecto es la “rugosidad macroscópica” que puede afectar a los peatones cuando caminan cerca de una pared. En este sentido, suponemos que en la vida real sería posible controlar k_w agregando irregularidades macroscópicas (como objetos cerca de las paredes) para obligar a los peatones a caminar más lento cuando pasan cerca de una pared.

Por razones de simplicidad, omitiremos las unidades del coeficiente de fricción k_w . Tenga en cuenta que sus unidades son $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$. Las variables estructurales d y el gap (espacio entre paneles) se expresan en unidades de diámetro de los agentes. Por ejemplo, $\text{gap} = 3$ significa que el tamaño es $\text{gap} = 3 \times 0,46 \text{ m} = 1,38 \text{ m}$ (dado que el diámetro del agente es $0,46 \text{ m}$).

El flujo de evacuación se define como $J_e = n/t_e$ donde n es el número de peatones evacuados y t_e es el tiempo que le lleva evacuar esos n peatones.

5.3. Vestíbulo de 2 puertas

En esta sección presentamos los resultados correspondientes a las evacuaciones con vestíbulos abiertos de 2 puertas. En la Fig. 5.1 se muestra un esquema de este tipo de recinto. El diseño consta de un panel unidimensional posicionado simétricamente en frente a la puerta de salida. Este panel da origen a un vestíbulo, es decir, una “habitación” inmediata a la puerta de salida. Existen dos puertas de ingreso al vestíbulo (la puerta izquierda y la puerta derecha). Ambas puertas son perpendiculares a la puerta de salida. En el apéndice A.4 se encuentran los detalles acerca de las dimensiones del vestíbulo y cómo fueron hechos los cálculos de este capítulo.

Comenzamos mostrando cómo la velocidad de deseo (v_d) y el ancho del vestíbulo (d) afectan el flujo de evacuación. El ancho del vestíbulo d es la distancia entre el panel y la puerta de

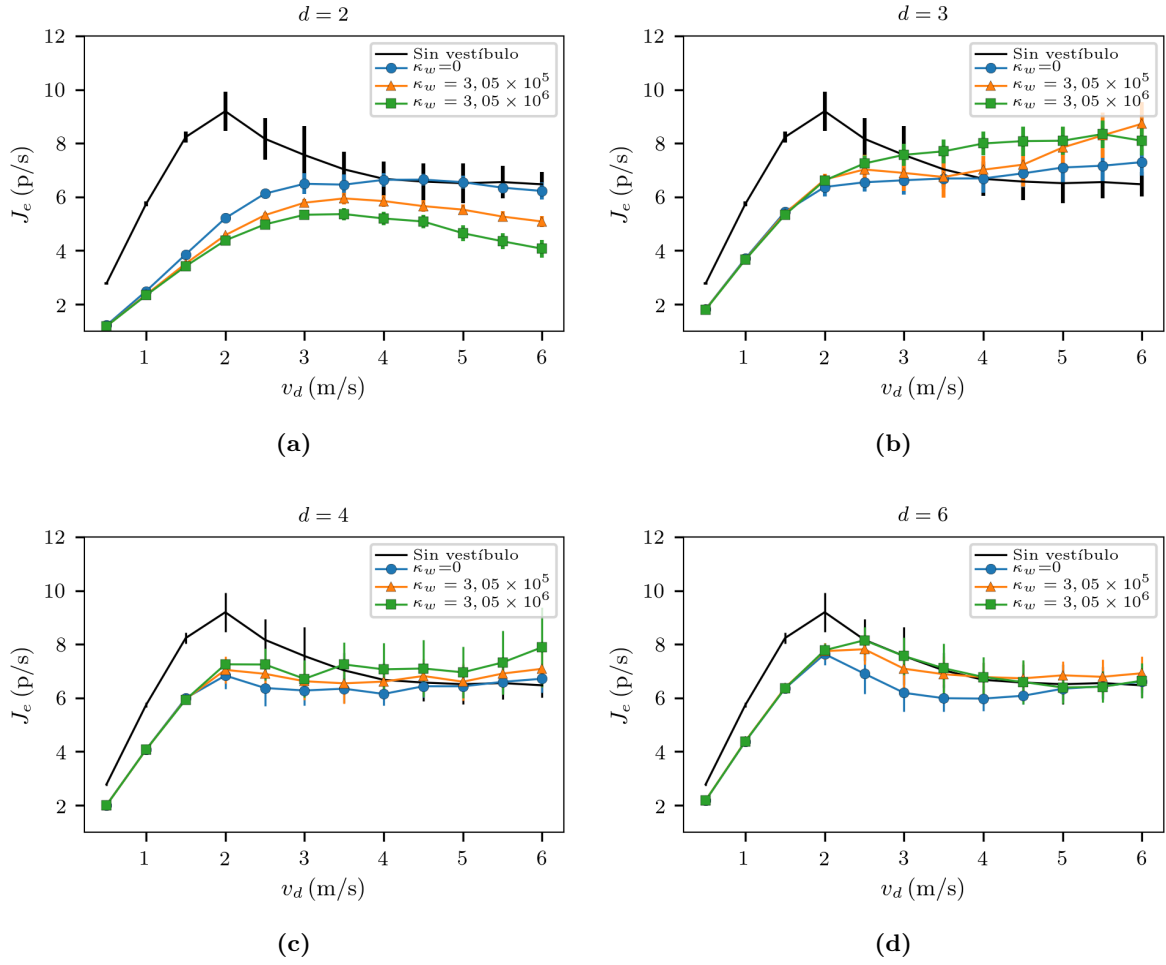


Figura 5.2: Flujo de evacuación en función de la velocidad de deseo para vestíbulos abiertos de dos puertas. Las mediciones se promedian en 30 procesos de evacuación donde las posiciones y velocidades iniciales se establecieron al azar. El número inicial de peatones es $N = 200$. En el encabezado de cada gráfico se menciona la distancia correspondiente desde el obstáculo hasta la puerta de salida. Consulte la leyenda para el valor del coeficiente de fricción de la pared κ_w .

Además, se debe tener en cuenta que en estado de alta densidad, los individuos no son capaces de correr muy rápido pero la presión que pueden generar es la que corresponde a una v_d muy alta (sobre todo los individuos más “fuertes”). Es decir, v_d no necesariamente debe asociarse a una velocidad alcanzable.

La figura 5.3a muestra el flujo de evacuación en función del ancho del vestíbulo d . El eje horizontal está en escala de diámetro de individuo y cada curva está asociada a un valor particular de coeficiente de fricción k_w . Las líneas punteadas horizontales representan el flujo de evacuación para la situación sin vestíbulo. Cada línea corresponde a un valor de k_w diferente; las letras ‘a’, ‘b’ y ‘c’ en la Fig. 5.3a representan $k_w = 0$; $3,05 \times 10^5$; $3,05 \times 10^6$, respectivamente. Los valores de flujo asociados a estos k_w son $J_a = (6,8 \pm 0,5)$ p/s, $J_b = (6,4 \pm 0,4)$ p/s y $J_c = (6,0 \pm 0,6)$ p/s. Cuando las curvas superan las líneas punteadas horizontales, significa que la colocación del vestíbulo mejora la evacuación.

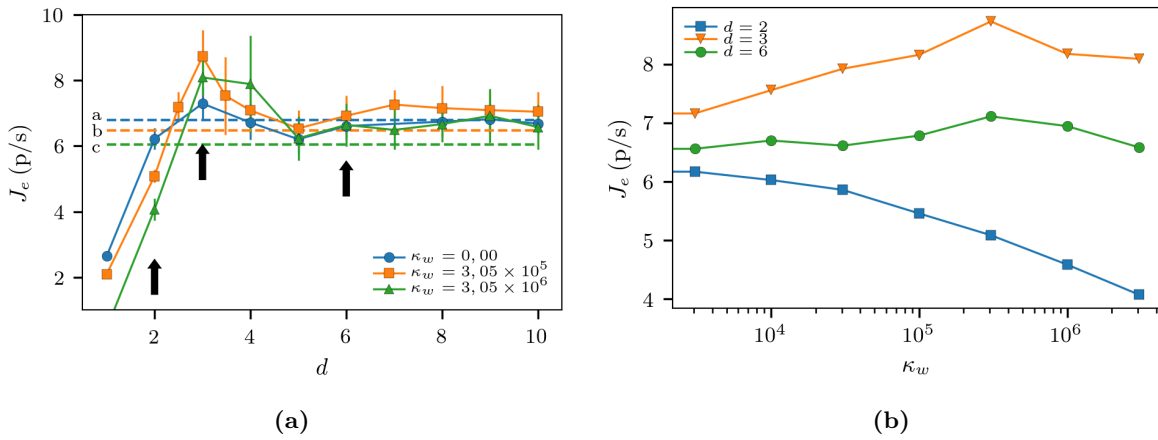


Figura 5.3: (a) Flujo de evacuación en función del ancho del vestíbulo d . Las flechas negras indican los valores de d seleccionadas que se exploraron en la Fig. 5.3b. El eje horizontal está en unidades de diámetro del peatón $\text{Diam} = 0,46$ m. (b) Flujo de evacuación en función del coeficiente de fricción de la pared k_w . Los datos se promediaron en 30 procesos de evacuación donde las posiciones y velocidades iniciales fueron aleatorias. El número inicial de peatones es $N = 200$. La velocidad de deseo es $v_d = 6$ m/s.

Las tres curvas de la Fig. 5.3a exhiben un comportamiento cualitativo similar: para los valores más bajos de d , las curvas aumentan hasta alcanzar un máximo, luego decrecen convergiendo al flujo sin vestíbulo. Un comportamiento similar fue reportado en [128], a pesar de que se utilizaron obstáculos en forma de pilar y agentes con forma elíptica.

Nótese que cada curva de la Fig. 5.3a tiene un intervalo específico de d para el cual se tiene un mayor flujo de evacuación que el que se obtiene para una situación sin vestíbulo. En otras palabras, la colocación de un obstáculo tipo panel puede mejorar o empeorar el rendimiento de evacuación dependiendo de su ubicación con respecto a la puerta de salida. Por ejemplo, si $k_w = 0$, la performance de evacuación mejora solo para $d = 3$ (ver la curva del marcador circular y la línea horizontal ‘a’ de la Fig. 5.3a).

El comportamiento cualitativo de las curvas de flujo vs. d es consistente con algunos resultados experimentales informados recientemente. Por ejemplo, el incremento de flujo para valores bajos de d se informa en [52, 57, 106], mientras que la reducción del flujo para d grande se reporta en [53]. Es importante señalar que las simulaciones numéricas reportadas en este capítulo no pretenden replicar dichos experimentos. Sin embargo, vale la pena remarcar las similitudes entre las simulaciones numéricas y los resultados experimentales en cuanto al comportamiento del flujo vs. d .

El coeficiente de fricción k_w influye significativamente en la evacuación. Para estudiar más en detalle este fenómeno, mostramos en la Fig. 5.3b el flujo de evacuación en función de k_w para tres valores representativos de d . Estos valores son: $d = 2, 3, 6$.

Si el vestíbulo es estrecho ($d = 2$), el aumento de k_w reduce el flujo de evacuación debido a la fricción en los *blocking clusters* (discutiremos este aspecto más adelante). Para un vestíbulo más ancho ($d = 3$), aumentar k_w aumenta el flujo porque evita que más peatones accedan al vestíbulo. Si el vestíbulo es demasiado ancho ($d = 6$), el efecto de la fricción de las paredes es casi insignificante porque los individuos casi no entran en contacto con el obstáculo. Esto hace que el flujo permanezca aproximadamente constante para todos los valores de k_w explorados.

Estos resultados sugieren que la dinámica de las evacuaciones puede estar fuertemente influenciada por la superficie de las paredes y los obstáculos. Este hecho fue previamente planteado como hipótesis por Hoogendoorn & Daamen [129], pero no había sido probado numéricamente hasta la presente investigación (hasta donde tenemos conocimiento).

Para comprender mejor el mecanismo detrás de este fenómeno, estudiamos la relación flujo vs. densidad (el diagrama fundamental). Los resultados se muestran en la Fig. 5.4, donde cada gráfico está asociado a un valor fijo de d (ver los encabezados). Las figuras son *scatter plots* donde cada punto corresponde a un proceso de evacuación (con condiciones iniciales aleatorias). Los colores representan el valor del coeficiente de fricción (ver las leyendas). En cada gráfico aparece una línea amarilla que representa la media móvil de los puntos de medición.

Antes de centrarnos en cada gráfico de la Fig. 5.4, mencionamos dos características comunes en ellos. La primera característica es la correlación negativa entre el coeficiente de fricción y la densidad (es decir, cuanto mayor es la fricción, menores son los valores de densidad; ver los colores de los puntos de datos). La segunda característica a destacar es el hecho que aparecen los dos regímenes que caracterizan al diagrama fundamental: el régimen de flujo libre (donde al aumentar la densidad aumenta el flujo) y el régimen congestionado (donde al aumentar la densidad se reduce el flujo). Las situaciones exploradas en la Fig. 5.4 muestran uno o ambos regímenes dependiendo del valor de d .

Procedemos ahora a discutir cada gráfico por separado. La Fig. 5.4a corresponde a $d = 2$. Solo se observa el régimen de flujo libre para cualquiera de los valores de k_w explorados. En este caso, el flujo no alcanza el máximo porque para valores tan bajos de densidad ($\rho < 2 \text{ p/m}^2$) queda espacio sin ocupar en el vestíbulo. Esto significa que más agentes podrían potencialmente ingresar al vestíbulo sin producir congestión en la puerta de salida.

Luego, en la Fig. 5.4b el vestíbulo tiene ancho $d = 3$. Esta situación permite observar ambos regímenes del diagrama fundamental (el de flujo libre y el de congestión). También destacamos que los valores máximos de flujo corresponden a densidades intermedias $\rho \sim 2 \text{ p/m}^2$ (ver el área sombreada).

Las figuras. 5.4c y 5.4d corresponden a $d = 4$ y $d = 6$, respectivamente. En estas condiciones, solo se observa el régimen congestionado. En otras palabras, las entradas al vestíbulo son tan grandes que los agentes casi no tienen impedimento para acceder al vestíbulo, lo que finalmente congestiona el área cercana a la puerta de salida.

Los cuatro gráficos exhiben una clara relación entre la densidad y el flujo. Si la densidad es muy baja ($\rho < 1,5 \text{ p/m}^2$) o muy alta ($\rho > 3 \text{ p/m}^2$), el flujo no alcanzará su valor máximo. Por otro lado, valores intermedios de densidad ($\rho \sim 2 \text{ p/m}^2$) maximizan el flujo de evacuación porque no hay ni congestión ni espacio libre (desaprovechado) en el vestíbulo; ver las áreas sombreadas de las Figs. 5.4b y 5.4c.

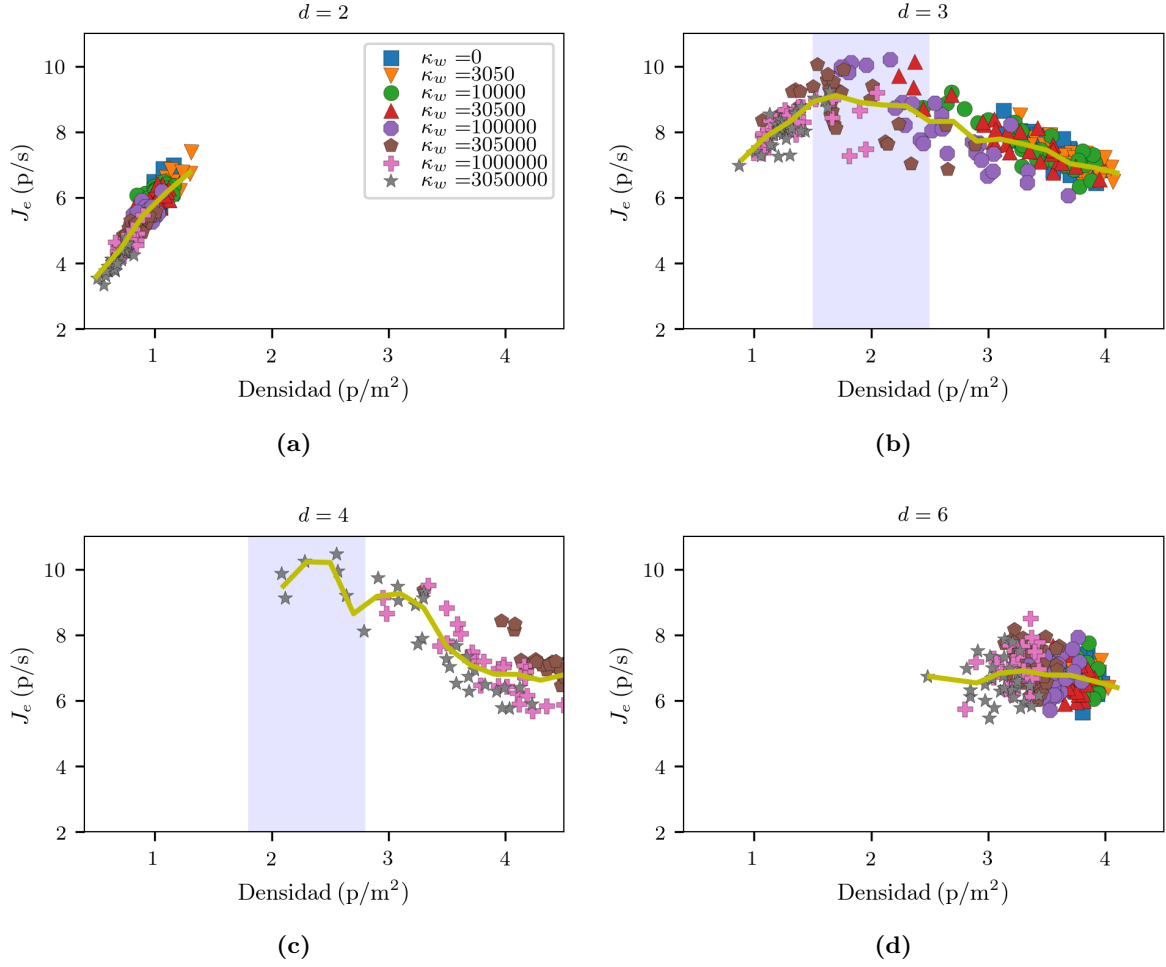


Figura 5.4: Flujo de evacuación en función de la densidad (diagrama fundamental) para un vestíbulo de dos entradas. Se midió la densidad en el vestíbulo interior y se muestreó hasta evacuar el 90 % de los individuos. Cada punto pertenece a un proceso de evacuación diferente donde las condiciones iniciales (posiciones y velocidades) fueron aleatorias. El número inicial de peatones es $N = 200$. La velocidad de deseo es $v_d = 6$ m/s. El área sombreada resalta las densidades que producen el flujo máximo.

Los resultados que se muestran en la Fig. 5.4 indican que una densidad demasiado baja (o demasiado alta) conduce a una situación subóptima con un flujo reducido. Por lo tanto, afirmamos que el mejor rendimiento de evacuación se logra con valores de densidad intermedios. En los papers de Zhao et al. [53, 56], los autores sugieren que disminuir la densidad es suficiente para aumentar el flujo. Nosotros argumentamos que una disminución excesiva también provoca una reducción del flujo. Por lo tanto, si se desea maximizar el flujo de evacuación sugerimos seleccionar apropiadamente los valores d y k_w para mantener bajo control a la densidad del vestíbulo.

Enfatizamos que la densidad se puede controlar con k_w y d . Así mismo, la densidad del vestíbulo determina el flujo de evacuación. En consecuencia, el flujo de evacuación se puede optimizar ajustando k_w y d para un valor dado de v_d .

Otros investigadores argumentan que la velocidad (y por tanto el flujo) no está determinada únicamente por la densidad [130]; es por eso que introducen una métrica llamada “esfuerzo cinético” para completar la descripción de la dinámica. Sin embargo, en nuestra investigación no es necesario incluir métricas adicionales ya que la densidad (medida en el vestíbulo interior) es suficiente para determinar el flujo de evacuación.

Como se mencionó anteriormente, para un v_d dado, los parámetros k_w y d controlan la densidad en el vestíbulo interior. Este fenómeno se representa más claramente en la Fig. 5.5, donde mostramos la densidad como una función de k_w para diferentes valores de d . Aumentar k_w disminuye la densidad porque los peatones quedan momentáneamente atrapados en las zonas previas al vestíbulo (lo que alivia la congestión cerca de la puerta de salida).

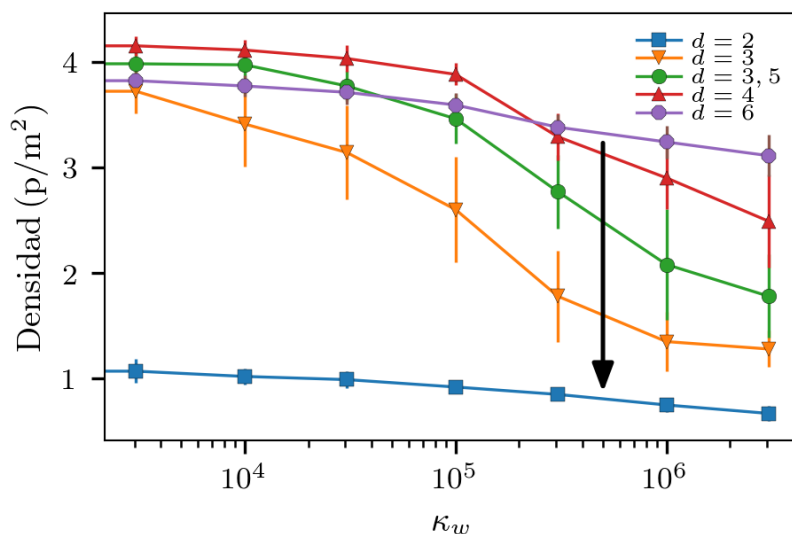


Figura 5.5: Densidad en función del coeficiente de fricción de las paredes. Se midió la densidad en el vestíbulo interior y se muestreó hasta evacuar el 90 % de los individuos. Las mediciones se promediaron en 30 procesos de evacuación. Las condiciones iniciales (posición y velocidad) fueron aleatorias. El número inicial de peatones es $N = 200$. La velocidad de deseo es $v_d = 6$ m/s. Consulte la leyenda del gráfico para conocer el ancho del vestíbulo d .

De la misma forma, observamos en la Fig. 5.5 que al reducir el tamaño del vestíbulo también disminuye la densidad (ver el sentido de la flecha negra). Este fenómeno se produce porque las entradas del vestíbulo disminuyen al disminuir d . Esto dificulta el acceso de los individuos al vestíbulo. Por lo tanto, es posible reducir la densidad cerca de la puerta de salida aumentando k_w o reduciendo d , ya que ambos efectos dificultan la entrada de individuos al vestíbulo.

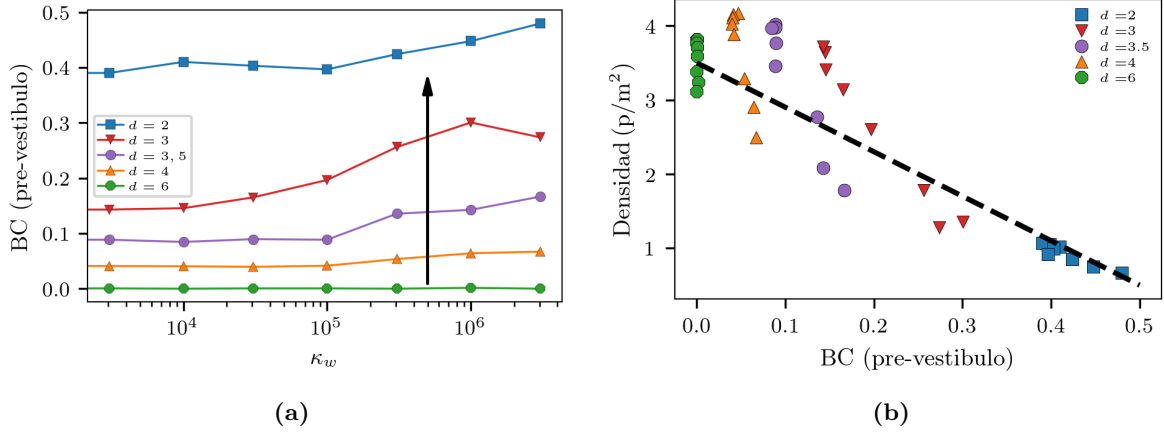


Figura 5.6: (a) Probabilidad de *blocking cluster* previo al vestíbulo en función del coeficiente de fricción de la pared. El valor informado es el valor medio de la probabilidad del bloqueo teniendo en cuenta las dos entradas al vestíbulo. (b) Densidad del vestíbulo interior en función de la probabilidad de formar *blocking clusters* en las puertas del vestíbulo. Cada punto corresponde a un valor de fricción diferente. La línea punteada es una guía visual para ver la tendencia decreciente. Las mediciones se promediaron en 30 procesos de evacuación para condiciones iniciales aleatorias (posición y velocidad). El número inicial de peatones es $N = 200$. La velocidad de deseo es $v_d = 6$ m/s. Ver las leyendas para conocer los tamaños del vestíbulo d .

Hemos mostrado que la densidad del vestíbulo puede ser regulada por k_w y d . Al mismo tiempo, el flujo de evacuación depende de la densidad del vestíbulo interior. La pregunta restante es, ¿cuál es el mecanismo por el cual k_w y d controlan la densidad? Para responder a esta pregunta, estudiamos los *blocking clusters* formados en las entradas del vestíbulo. Recordar que los *blocking clusters* son aglomeramientos de peatones que bloquean una puerta (en este caso, las entradas al vestíbulo son consideradas puertas).

La Fig. 5.6a muestra la probabilidad de tener un *blocking cluster* en la zona previa al vestíbulo en función de k_w para diferentes valores de d . La zona previa al vestíbulo se muestra en la ilustración de la Fig. 5.1. La probabilidad está definida como el cociente entre tiempo en que se tienen *blocking clusters* y el tiempo total de evacuación. En la Fig. 5.6a mostramos el valor medio de la probabilidad de bloqueo considerando ambas entradas al vestíbulo. Es decir, el promedio de la probabilidad de formar *blocking clusters* en cada una de las entradas.

El aumento del coeficiente de fricción de la pared k_w produce *blocking clusters* más persistentes. Este fenómeno se puede ver a partir del comportamiento creciente de las curvas de la Fig. 5.6a. En el mismo sentido, cuanto más estrechas sean las entradas al vestíbulo (menor d), mayor será la probabilidad de bloqueo (ver el sentido de la flecha). Este efecto también se analizó en Ref. [47] para el caso de *bottlenecks* sin obstáculo. En resumen, encontramos que aumentar k_w o reducir d incrementan la probabilidad de producir *blocking clusters* en las entradas del vestíbulo. En consecuencia, esto reduce la densidad en el interior del vestíbulo como se muestra en la figura 5.6b.

Podemos resumir los resultados de esta sección de la siguiente manera. Encontramos que el coeficiente de fricción de la pared k_w y el ancho del vestíbulo d afectan la densidad en el interior del vestíbulo. El mecanismo detrás de esto involucra a los *blocking clusters* en la zona “pre-vestíbulo”. Además, mostramos que la densidad del vestíbulo interior determina el flujo de evacuación (expresado a través del diagrama fundamental). El flujo máximo se da para valores intermedios de densidad ($\rho \sim 2$ p/m²). Si la densidad es muy alta o muy baja, el flujo de evacuación es subóptimo. Se encontró que la presencia del vestíbulo mejora la evacuación para valores altos de v_d que pueden estar relacionados con situaciones estresantes en las que los

peatones pueden sufrir lesiones considerables (no consideradas en esta investigación).

5.4. Vestíbulo de 3 puertas

La sección anterior trataba sobre las evacuaciones en presencia de vestíbulo de dos entradas. El vestíbulo de dos entradas se diseña colocando un único panel frente a la puerta de salida. Como primer paso hacia el análisis de estructuras más complejas, estudiamos las evacuaciones a través de un vestíbulo de tres entradas diseñado a partir de dos obstáculos tipo panel (como se ilustra en la Fig. 5.7). La velocidad de deseo de los agentes se fijó en $v_d = 6$ m/s.

Los resultados anteriores muestran que la densidad del vestíbulo (y por lo tanto, el flujo de evacuación) puede controlarse mediante k_w y d . En este sentido, el “gap” entre los dos paneles del vestíbulo de 3 puertas introduce un nuevo parámetro capaz de regular la densidad. Notar que el gap funciona como una entrada adicional del vestíbulo. Elegimos intencionalmente una configuración altamente simétrica para evitar diferencias de trayectoria. [55].

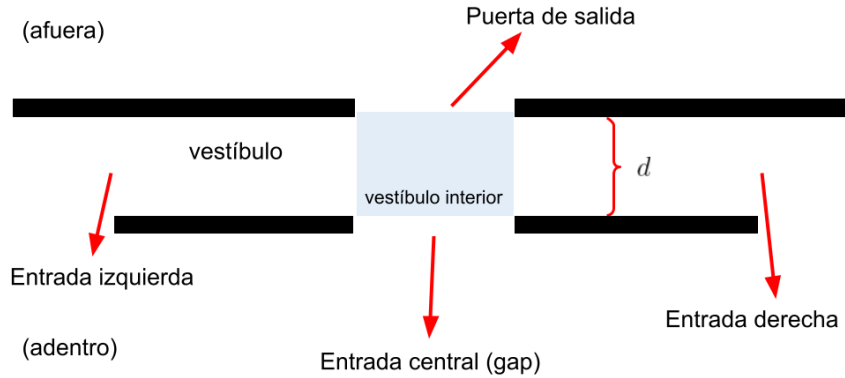


Figura 5.7: Representación esquemática del vestíbulo abierto de 3 puertas. La letra d denota el ancho del vestíbulo. El “vestíbulo interior” es el área sombreada. El espacio entre los paneles es el “gap” (la puerta central del vestíbulo).

En primer lugar, medimos el flujo de evacuación J_e en función de v_d para el vestíbulo de tres entradas. La Fig. 5.8 muestra los resultados correspondientes a diferentes valores de d (ver los encabezados de los gráficos). En este caso, variamos el espacio entre los paneles (gap) como se indica en la leyenda de los gráficos y fijamos el coeficiente de fricción de la pared en $k_w = 3,05 \times 10^5$.

Si bien para $d = 4$ (Fig. 5.8c) la presencia del vestíbulo produce resultados similares a los de la condición “sin vestíbulo”, si $d = 2$ o $d = 3$ existen valores de gap y v_d que producen flujos de evacuación muy superiores a los de la situación sin vestíbulo.

En esta sección, fijamos k_w y v_d para enfocarnos solo en los efectos del gap y d . La Fig. 5.9 muestra diagramas fundamentales (flujo vs. densidad) para tres tamaños de vestíbulo diferentes ($d = 2, 3$, y 4), donde cada gráfico está asociado a un valor fijo de d (ver encabezados). Calculamos la densidad y el flujo de evacuación siguiendo los mismos criterios que en la sección anterior. Cada punto en los gráficos corresponde a un proceso de evacuación (con condiciones iniciales aleatorias).

La Fig. 5.9a muestra los resultados para $d = 2$, los colores de los puntos representan los diferentes

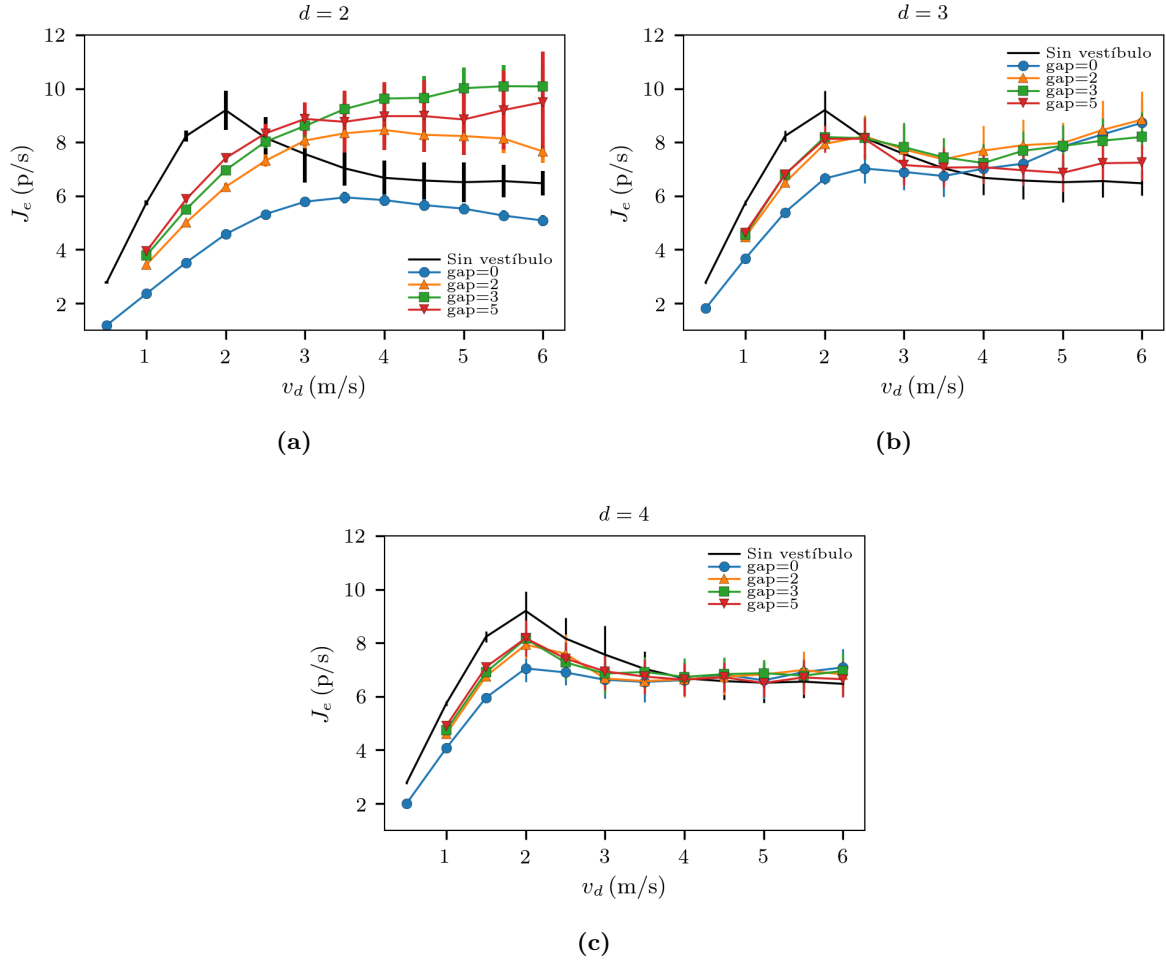


Figura 5.8: Flujo de evacuación en función de la velocidad de deseo para vestíbulos de tres entradas. Los datos se promediaron en 30 procesos de evacuación que terminaron cuando el 90 % de los agentes evacuaron. El número inicial de peatones es $N = 200$. Ver el encabezado del gráfico para conocer el ancho del vestíbulo d . Ver la leyenda para el gap entre los obstáculos. El coeficiente de fricción de la pared se fijó en $k_w = 3,05 \times 10^5$.

valores de gap entre paneles. Notar que los distintos valores del gap producen intervalos de densidad bien distinguibles. Por ejemplo, $\text{gap}=0$ produce densidades por debajo de $\rho < 1 \text{ p/m}^2$, mientras que $\text{gap} = 4$ produce densidades dentro del intervalo $2,5 \text{ p/m}^2 < \rho \leq 3,0 \text{ p/m}^2$. Vale la pena mencionar que en la Fig. 5.9a se exhiben los dos regímenes (flujo libre y flujo congestionado).

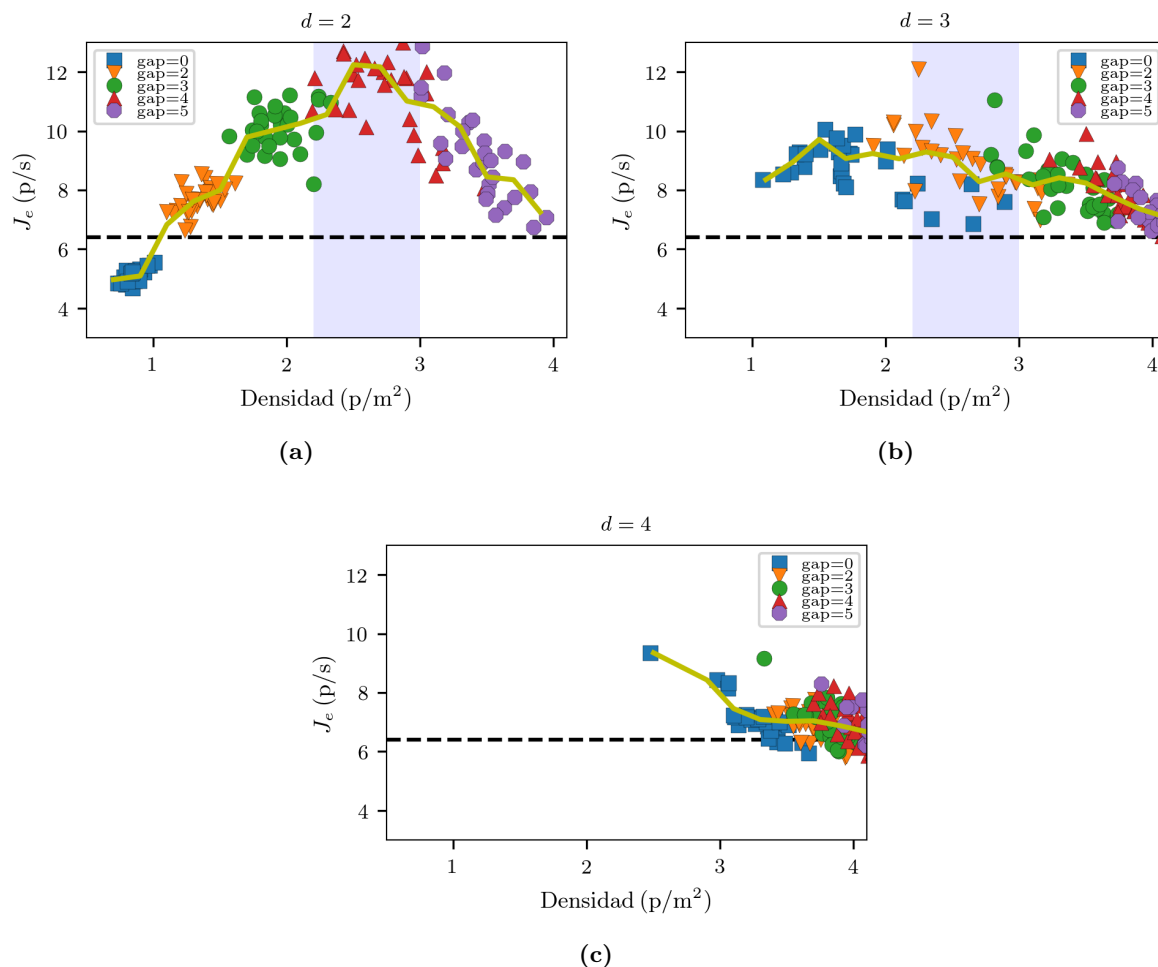


Figura 5.9: Flujo de evacuación en función de la densidad (diagrama fundamental) para un vestíbulo de tres entradas. Se midió la densidad en el vestíbulo interior y se muestreó hasta evacuar el 90 % de los individuos. Hay 30 puntos de datos para cada valor de gap. Cada punto de datos corresponde a un proceso de evacuación diferente con condiciones iniciales aleatorias. El número inicial de peatones fue $N = 200$. La línea amarilla representa la media móvil sobre los datos. La velocidad de deseo es $v_d = 6 \text{ m/s}$. Ver el encabezado de cada gráfico para conocer el ancho del vestíbulo d . El área sombreada resalta las densidades que producen el flujo máximo y la línea punteada indica el flujo para la situación sin vestíbulo.

La figura 5.9b corresponde a $d = 3$. Aquí también están presentes los dos regímenes del diagrama fundamental (el régimen de flujo libre y el régimen congestionado) dependiendo del valor del gap. Si $\text{gap} = 5$, solo se observa el régimen congestionado, lo que significa que los agentes pueden aglomerar fácilmente el vestíbulo. Colocar los obstáculos en $d = 3$ produce resultados más dispersos y con una tendencia menos clara que en $d = 2$. Sin embargo, todavía es posible asociar diferentes valores de gap con valores de densidad bien distinguibles.

Si la distancia entre los paneles y la puerta de salida es $d = 4$ (Fig. 5.9c), no se puede conseguir el flujo de evacuación óptimo porque la densidad es demasiado alta (independientemente del valor del gap). Este fenómeno ocurre porque la entrada izquierda y la entrada derecha del vestíbulo son lo suficientemente grandes como para facilitar simultáneamente el acceso de muchos individuos,

lo que lleva a la congestión en la vecindad de la puerta de salida. Bajo esta condición, no hay una relación unívoca entre los valores de gap y la densidad del vestíbulo.

Los resultados correspondientes al vestíbulo de tres puertas comparten algunas similitudes con los resultados del vestíbulo de dos puertas. En ambos casos, el flujo óptimo se alcanza para valores de densidad intermedios ($\rho \sim 2 \text{ p/m}^2$); compárese, por ejemplo, las áreas sombreadas de las Figs. 5.4b, 5.4c y 5.9a. Si la densidad es demasiado alta, en todos los casos, conduce a un régimen congestionado que produce un flujo de evacuación subóptimo. Si la densidad es demasiado baja, el flujo también está por debajo de la condición óptima.

Más allá de las similitudes, cabe señalar que el vestíbulo de tres entradas produce un flujo máximo ($J \sim 11 \text{ p/s}$) superior al flujo máximo alcanzado con el vestíbulo de dos entradas ($J \sim 8 \text{ p/s}$).

Un aspecto inquietante es si el vestíbulo puede inducir densidades más altas que la condición sin vestíbulo. Hicimos una exploración preliminar y encontramos que el vestíbulo alivia la densidad general (incluso en la zona anterior al vestíbulo). Este fenómeno ocurre porque el obstáculo en forma de panel induce a la multitud a dispersarse más ampliamente, lo que reduce la probabilidad de crear puntos de alta densidad. Esta conjetura será discutida en el próximo capítulo.

Vale la pena mencionar que el estudio numérico de Li et al. [131] afirma que algunas configuraciones (como el diseño de obstáculos asimétricos) pueden inducir valores de congestión promedio más altos. Si bien esto es diferente de lo analizado en esta tesis, alentamos a realizar más investigaciones para estudiar los posibles pros y contras en el diseño del vestíbulo.

La conclusión final de esta sección es que el espacio entre dos paneles (gap) se puede utilizar como una forma efectiva de regular la densidad en el vestíbulo y por lo tanto maximizar el flujo de evacuación. Este resultado promueve la creación de diseños arquitectónicos novedosos que pueden inducir a un mejor rendimiento de la evacuación en situaciones de alta ansiedad. Queremos destacar que no sugerimos reemplazar al personal de manejo de multitudes ni los sistemas de señales [132], más bien argumentamos que los resultados aquí mostrados son una mejora arquitectónica para las evacuaciones de emergencia, al margen de otras posibles mejoras.

5.5. Conclusiones

De acuerdo con nuestras simulaciones numéricas, la colocación de un panel frente a la puerta de salida crea una estructura de vestíbulo que mejora el rendimiento de evacuación para distancias intermedias puerta-obstáculo ($d \sim 3$). En este capítulo examinamos los efectos de colocar un vestíbulo abierto de dos entradas (diseñado con un solo panel) y un vestíbulo abierto de tres entradas (diseñado con dos paneles).

En ambos casos, encontramos que la densidad dentro del vestíbulo determina el flujo de evacuación. Si el vestíbulo interior se atasca (por la alta densidad), el flujo de evacuación disminuye. Si la densidad es demasiado baja, el flujo también está en una situación subóptima ya que queda espacio sin usar en el vestíbulo. Es decir, más peatones podrían ingresar potencialmente al vestíbulo sin producir congestión en la puerta de salida. Por otro lado, valores intermedios de densidad ($\rho \sim 2 \text{ p/m}^2$) maximizan el flujo de evacuación. Este resultado es válido para todas las condiciones exploradas en este capítulo.

Nuestra principal conclusión es que, al menos tres parámetros son útiles para regular la densidad en el interior del vestíbulo (y por tanto el flujo de evacuación). Estos parámetros son: el coeficiente de fricción de la pared k_w , el ancho del vestíbulo d y el gap entre los dos paneles (en el caso de un vestíbulo de tres entradas). Vale la pena mencionar que estos parámetros son características estructurales que los arquitectos e ingenieros podrían controlar fácilmente.

Reducir d o aumentar k_w disminuye la densidad en el vestíbulo. Este fenómeno se explica por medio de los *blocking clusters* que aparecen en las entradas del mismo (limitando el acceso de los peatones). Asimismo, la reducción del espacio entre los dos paneles (gap) también disminuye la densidad.

Queremos destacar que el vestíbulo de tres entradas produce un flujo máximo ($J \sim 11 \text{ p/s}$) que es superior al flujo máximo alcanzado con el vestíbulo de dos entradas ($J \sim 8 \text{ p/s}$) e incluso mucho más alto que el flujo producido por un *bottleneck* sin vestíbulo ($J \sim 6 \text{ p/s}$). Este resultado sugiere que los vestíbulos abiertos de tres entradas podría mejorar considerablemente las evacuaciones de emergencia en situaciones de la vida real. Sin embargo, recomendamos que las conclusiones obtenidas en esta tesis sean sometidas a la evaluación empírica antes de validarse por completo.

Capítulo 6

Vestíbulos cerrados

En el capítulo anterior postulamos la idea de que colocar dos obstáculos tipo panel frente a la puerta de salida mejora el rendimiento de las evacuaciones de emergencia. Introdujimos el concepto de “vestíbulo” (es decir, el área cerca de la puerta de salida delimitada por los paneles). Concluimos que el flujo de evacuación está determinado por la densidad en su interior. Además, la densidad se puede controlar mediante características estructurales como el número de puertas, el ancho del vestíbulo y el coeficiente de fricción de la pared.

En este capítulo continuamos explorando los vestíbulos como una forma de mejorar las evacuaciones de emergencia, pero, a diferencia del capítulo anterior, en este capítulo exploramos los “vestíbulos cerrados” (Fig. 6.1 y Fig. 6.2). Estas estructuras están conformadas por paneles que son tan grandes como el tamaño del recinto.

6.1. Introducción

Como mencionamos a lo largo de esta tesis, la comunidad científica y los ingenieros están proponiendo un número creciente de ideas para abordar los problemas que surgen durante las evacuaciones de emergencia [29, 107]. Las soluciones propuestas se pueden clasificar en tres categorías [133]: soluciones basadas en la planificación, soluciones basadas en el comportamiento y soluciones basadas en la arquitectura.

En primer lugar, las “soluciones basadas en la planificación” consisten en optimizar el programa de salida (en términos de tiempo) y planificar el camino correcto para escapar de un edificio [134, 135]. A veces, estas soluciones requieren de una autoridad central para controlar a la multitud. En segundo lugar, las “soluciones basadas en el comportamiento” consisten en proponer modificaciones en la actitud de los peatones [136, 137]. Estas soluciones requieren capacitación e instrucciones adecuadas para ser adquiridas por los individuos que potencialmente podrían verse en la obligación de evacuar un determinado recinto.

Finalmente, las “soluciones basadas en la arquitectura” consisten en proponer ajustes de diseño e infraestructura que reduzcan el tiempo de evacuación y aumenten la seguridad durante el proceso de evacuación. A diferencia de las dos propuestas anteriores, las soluciones basadas en la arquitectura no requieren el direccionamiento de los peatones ni en el entrenamiento de los individuos involucrados.

Entre los tres enfoques, el más popular, y en nuestra opinión el más relevante, es el de las

soluciones basadas en la arquitectura. En particular, colocar una salida en la esquina de una habitación [52] y colocar un obstáculo frente a la puerta de salida [51] parecen reducir el tiempo de evacuación para una gran variedad de situaciones exploradas [53, 54, 138].

En una evacuación de emergencia, además de mejorar el flujo de evacuación, es importante reducir la presión física que soportan las personas involucradas. En la literatura aparecieron muchos enfoques diferentes con respecto al estudio de la presión en dinámica peatonal [125]. La presión utilizada en algunos estudios empíricos y experimentales se define como el producto de la densidad local y la varianza de la velocidad [116]. Se ha demostrado que esta magnitud correlaciona con la probabilidad de tropezar y el nivel de ansiedad de los individuos [130].

Otro enfoque que vale la pena mencionar es el estudio realizado por Cornes et al. donde definen a la presión como una función de las fuerzas normales que actúan sobre los individuos [139]. En línea con esto, cabe destacar los esfuerzos experimentales realizados por diferentes autores que elaboran “chalecos de presión” para medir las fuerzas de contacto aplicadas al tórax humano [140].

Tanto el capítulo anterior como este capítulo se enmarcan en el enfoque basado en la arquitectura. En particular, en este capítulo investigamos evacuaciones de emergencia en presencia de vestíbulos cerrados. El vestíbulo cerrado se define como la habitación próxima a la puerta de salida que está delimitada por obstáculos con forma de panel. Mostramos que este diseño es capaz de mejorar las evacuaciones de emergencia por dos razones. Por un lado, aumenta sustancialmente el flujo de evacuación de peatones. Por otro lado, reduce la presión que se ejerce sobre ellos.

6.2. Recintos explorados

En este capítulo exploramos dos diseños diferentes: el vestíbulo cerrado de 1 puerta y el vestíbulo cerrado de 2 puertas. La figura 6.1 ilustra el diseño del vestíbulo de 1 puerta (en algunas ocasiones lo llamaremos vestíbulo 1-puerta). Esta estructura consta de cuatro paredes en total. Dos paredes delimitan la puerta de salida y, otras dos paredes/paneles delimitan la puerta del vestíbulo.

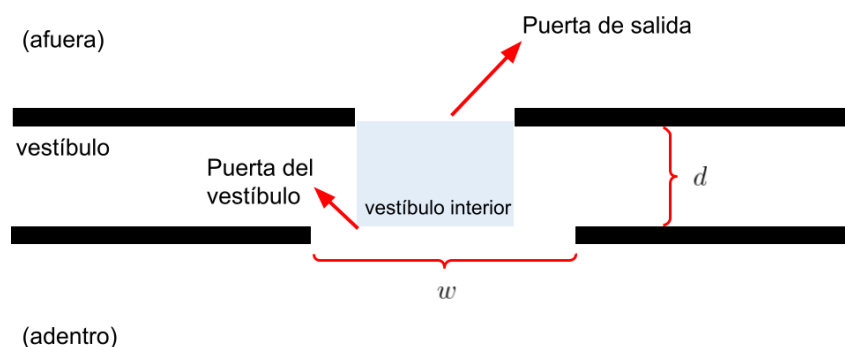


Figura 6.1: Esquema del vestíbulo 1-puerta. La puerta del vestíbulo (de ancho w) está ubicada frente a la puerta de salida. El vestíbulo luce como un pasillo tan largo como la habitación y de ancho d . Los lados de la habitación no están dibujados.

El vestíbulo cerrado puede pensarse como un pasillo tan largo como el ancho de la habitación

y de ancho d . En particular, el vestíbulo cerrado de una puerta tiene una sola puerta de ancho w frente a la puerta de salida.

El área sombreada en la Fig. 6.1 representa el “vestíbulo interior”, que definimos como el área rectangular encerrada por la puerta de salida y la puerta del vestíbulo. Al igual que en el capítulo anterior, esta área será relevante en nuestros análisis.

El diseño del vestíbulo de 2 puertas (también llamado vestíbulo 2-puertas) se muestra en la Fig. 6.2. En este caso, cada puerta del vestíbulo tiene un ancho $w/2$ (w es el tamaño total de las puertas de ingreso al vestíbulo). Las dos puertas del vestíbulo están separadas por una pared/panel de igual tamaño a la puerta de salida. Esta pared se encuentra ubicada frente a la puerta de salida y las 2 puertas del vestíbulo están situadas simétricamente respecto de ésta. El área sombreada en la Fig. 6.2 representa el vestíbulo interior. En este caso, se define como el área rectangular delimitada por la puerta de salida y la pared enfrente.

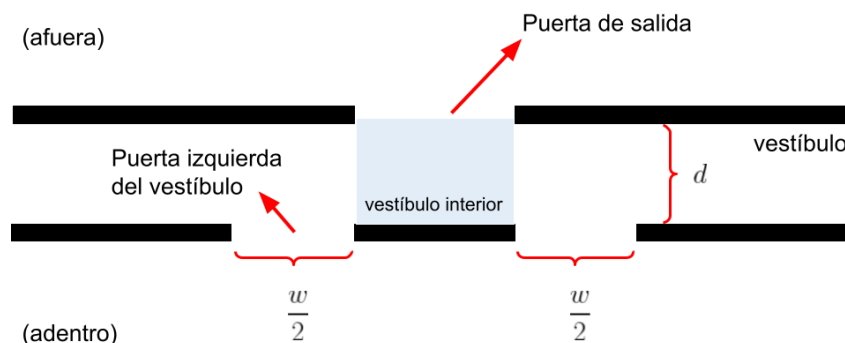


Figura 6.2: Esquema del vestíbulo 2-puertas. $w/2$ es el ancho de cada puerta del vestíbulo. Ambas puertas del vestíbulo están colocadas simétricamente frente a la puerta de salida. El vestíbulo luce como un pasillo tan largo como el ancho de la habitación y de ancho d . Los lados de la habitación no están dibujados.

6.3. Aclaraciones preliminares

Llamamos “parámetros estructurales” a d (el ancho del vestíbulo) y w (el ancho de la puerta del vestíbulo). Para mantener una notación clara, expresaremos los parámetros estructurales (d y w) en unidades del diámetro del agente. Por ejemplo, si $w = 4$, en realidad queremos decir que $w = 4 \times 0,46\text{m} = 1,84\text{m}$. Donde $0,46\text{m}$ es el ancho promedio de hombros reportado en [141]. Es decir que cuatro personas “hombro con hombro” entran en la puerta.

En cuanto a los obstáculos tipo panel que delimitan el vestíbulo, estos paneles llegan hasta los bordes del recinto. Por lo tanto, los individuos no pueden esquivarlos (a diferencia de lo que ocurre con los vestíbulos abiertos). Recordar además, que en esta investigación, los paneles se consideran paredes (lo que significa que las interacciones individuo-obstáculo son las mismas que las interacciones individuo-pared).

En este capítulo, utilizamos al *overlap* de los agentes como un indicador de la presión ejercida sobre ellos. Si bien el *overlap* no es lo mismo que la presión, argumentamos que cualquier medida razonable de presión debe estar correlacionada con el *overlap*. Esto se debe al hecho que todas las fuerzas que actúan en la dirección normal son funciones monótonamente crecientes en el *overlap*. Es por eso que en este capítulo utilizaremos el término “*overlap*” como sinónimo

de “presión”. Cabe señalar que, a mayor densidad mayor presión y a mayor densidad mayor *overlap*.

En algunas ocasiones, utilizamos el símbolo ρ para indicar la densidad en la región del vestíbulo interior. Del mismo modo, utilizamos el símbolo J_e para referirnos al flujo de evacuación.

6.4. Vestíbulo 1-puerta

En esta sección presentamos los principales resultados correspondientes al vestíbulo 1-puerta (que se introdujo previamente en la Fig. 6.1). Exploramos un amplio rango de valores para los parámetros estructurales d y w y sus consecuencias en el flujo de evacuación. Bajo ciertas condiciones estructurales, la presencia de un vestíbulo de 1-puerta mejora la evacuación. Al final de la sección, ofrecemos una explicación de porqué mejora del flujo. Esta explicación es análoga a las explicaciones del capítulo anterior, ya que involucra a la densidad dentro del vestíbulo y a los *blocking clusters*.

La Fig.6.3 muestra el flujo de evacuación en función del tamaño de la puerta del vestíbulo (w) para diferentes anchos de vestíbulo (d). La recta punteada horizontal representa el flujo para la situación “sin vestíbulo”. Si una curva supera esa línea, significa que el vestíbulo produce un flujo de evacuación mayor que la situación sin vestíbulo. Cada gráfico corresponde a una velocidad de deseo (v_d) diferente como se indica en los encabezados de cada figura.

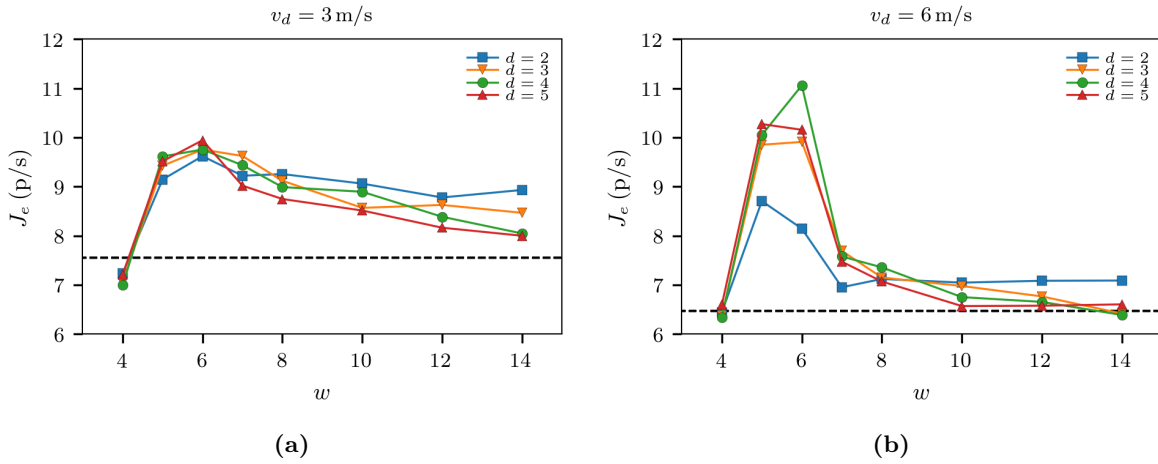


Figura 6.3: Flujo de evacuación en función del ancho de la puerta del vestíbulo w para vestíbulos cerrados de 1 puerta. Cada curva corresponde a un ancho de vestíbulo diferente d . La línea horizontal indica el flujo para el escenario “sin vestíbulo”. Los datos se promediaron en 30 procesos de evacuación con posiciones y velocidades iniciales aleatorias. El número inicial de peatones es $N=200$. (a) la velocidad de deseo es $v_d = 3$ m/s, (b) la velocidad de deseo es $v_d = 6$ m/s.

Si w es pequeño ($w \leq 4$), el flujo de evacuación de la situación con vestíbulo es igual (o menor que) el de la situación sin vestíbulo. En el límite opuesto ($w > 10$), el flujo de evacuación también converge a la situación sin vestíbulo. En particular, los valores intermedios de w producen un flujo de evacuación mucho más alto que la situación sin vestíbulo. Este comportamiento es válido para cualquier v_d en el rango de $2.5 \text{ m/s} \leq v_d \leq 6 \text{ m/s}$. La Fig. 6.3a y la Fig. 6.3b muestran los resultados correspondientes a $v_d = 3$ m/s y $v_d = 6$ m/s, respectivamente.

Observe que, independientemente de v_d , variar d no afecta el comportamiento cualitativo de las curvas de flujo. Sin embargo, el flujo de evacuación depende fuertemente de w . Por lo tanto,

para el vestíbulo de 1-puerta, podemos afirmar que el flujo de evacuación está dominado por el parámetro estructural w en lugar de d .

La mayor diferencia entre la situación del vestíbulo de 1-puerta y el escenario sin vestíbulo se da en $d = 4$, $w = 6$ y $v_d = 6$ m/s. En este caso, el incremento de flujo es superior a 4 p/s (lo que representa un incremento del 70 %). En una situación de la vida real, un contraste tan grande podría ser la diferencia entre una evacuación normal y un evento catastrófico.

En una primera inspección, el incremento de flujo proporcionado por el vestíbulo puede explicarse por la densidad en la zona del vestíbulo interior. Recordar que el diagrama fundamental (gráfico de flujo-densidad) presenta dos regímenes. El régimen de “flujo libre” (donde el flujo aumenta a medida que aumenta la densidad) y el régimen “congestionado” (donde el flujo disminuye a medida que aumenta la densidad). El primero está asociado a un escenario de baja densidad, mientras que el segundo está asociado a un escenario de alta densidad.

La Fig. 6.4a muestra el diagrama fundamental para el vestíbulo de 1 puerta en $d = 4$ y $v_d = 6$ m/s. La línea horizontal corresponde a la situación sin vestíbulo. Los marcadores representan diferentes valores de w y la curva sólida es la media móvil sobre los datos. Cada punto en el gráfico corresponde a una condición inicial diferente.

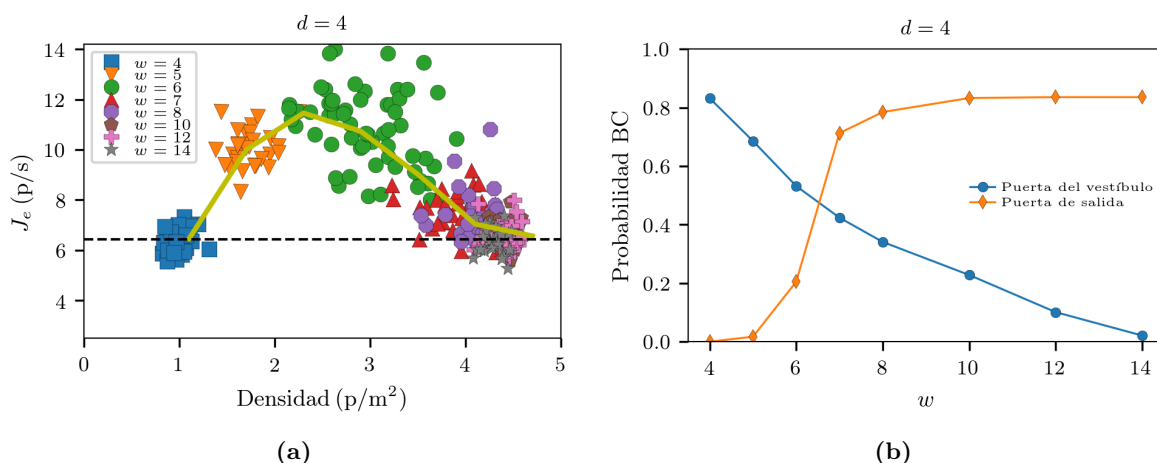


Figura 6.4: (a) Flujo de evacuación en función de la densidad (diagrama fundamental) para vestíbulos de 1 puerta. La línea horizontal indica el flujo para el escenario “sin vestíbulo”. La densidad se midió en el vestíbulo interior y se promedió hasta evacuar el 90 % de los individuos. Cada punto de datos pertenece a un único proceso de evacuación en el que las condiciones iniciales (posiciones y velocidades) se establecieron de forma aleatoria. (b) Probabilidad de formar *blocking clusters* en función del ancho de la puerta del vestíbulo w . La probabilidad se define como la fracción de tiempo que un *blocking cluster* está presente sobre el tiempo total de evacuación. El número inicial de individuos es $N=200$. La velocidad de deseo es $v_d = 6$ m/s.

Los valores más bajos de w producen un régimen de flujo libre, mientras que los más altos producen un régimen congestionado. Nótese que $w = 6$ es un ancho de puerta que da lugar a densidades intermedias ($\rho \sim 2,5$ p/m²) y produce el máximo flujo de evacuación. Explicaremos los detalles de este fenómeno al final de esta sección.

Si la densidad en el vestíbulo interior es baja (por ejemplo, $\rho \sim 1$ p/m²), el flujo de evacuación está por debajo de la condición óptima porque queda espacio sin usar cerca de la puerta de salida. Este fenómeno hace que la multitud evacue “a cuentagotas”.

Si la densidad es alta ($\rho \sim 4$ p/m²), el flujo de evacuación también es subóptimo porque el área cercana a la puerta de salida se congestiona y produce *blocking clusters* en la puerta de salida disminuyendo así el flujo.

Sin embargo, los valores intermedios de densidad ($\rho \sim 2,5$ p/m²) compensan los dos fenómenos mencionados anteriormente y, por lo tanto, maximizan el flujo de evacuación. Recordar que estos mismos comportamientos se discutieron en el capítulo anterior para los vestíbulos abiertos.

Para completar la comprensión del fenómeno, calculamos la probabilidad producir *blocking clusters* en la puerta de salida y también en la puerta del vestíbulo (ver Fig. 6.7a para reconocer los distintos tipos de *blocking clusters*). Como mencionamos en el capítulo 2, un *blocking cluster* se define como el conjunto de peatones en contacto físico que obstruyen una puerta. Estudios previos de este grupo han demostrado que los *blocking clusters* juegan un papel fundamental en los procesos de evacuación de alta ansiedad [47, 142].

La Fig. 6.4b muestra la probabilidad de formar *blocking clusters* en función del tamaño de la puerta del vestíbulo w . Esta probabilidad se define como la fracción de tiempo que un *blocking cluster* está presente respecto el tiempo total de evacuación.

La curva de los BC de la puerta del vestíbulo y la curva los BC de la puerta de salida muestran un patrón anticorrelacionado (ver Fig. 6.4b). Si la puerta del vestíbulo es pequeña ($w \leq 6$), existe una alta probabilidad de formar *blocking cluster* en la puerta del vestíbulo. Estos *blocking clusters* evitan que el vestíbulo interior tenga altas densidades. Esta es la razón por la que, para w pequeño, la presencia de *blocking clusters* en la puerta de salida es casi despreciable ($< 0,2$).

El aumento de w reduce los *blocking clusters* en la puerta del vestíbulo, lo que permite que un mayor número de peatones acceda al vestíbulo interior al mismo tiempo. Como consecuencia, la probabilidad de bloquear la puerta de salida muestra un fuerte aumento en $w = 7$. Notar que este incremento es consistente con la reducción de flujo del régimen congestionado exhibido en el diagrama fundamental (ver Fig 6.4a).

Vale aclarar que, aunque solo mostramos el diagrama fundamental y los *blocking clusters* correspondientes a $d = 4$, el comportamiento cualitativo a diferentes valores de d es similar. De la misma forma, a pesar de que solo mostramos resultados para $v_d = 3$ m/s y $v_d = 6$ m/s, los resultados son semejantes para cualquier velocidad de deseo en el intervalo $v_d \geq 2,5$ m/s.

Para concluir la sección, destacamos que el flujo de evacuación depende de la densidad del vestíbulo interior. Al mismo tiempo, esta densidad puede ser controlada (principalmente) por el parámetro estructural w . El resultado más importante es que el flujo de evacuación se maximiza cuando el vestíbulo interior alcanza el máximo valor de densidad tal que no se produzcan demasiados *blocking clusters* en la puerta de salida. Hay que tener en cuenta que la densidad en el vestíbulo tampoco puede ser demasiado baja para que los individuos no evacuen a “a cuentagotas”.

6.5. Vestíbulo 2-puertas

En esta sección presentamos los resultados correspondientes a vestíbulos cerrados de dos puertas (ilustrado en la Fig. 6.2). Esta sección está organizada de manera similar a la anterior. Primero exploramos los parámetros estructurales (d y w) y su relación con el diagrama fundamental. Luego, discutimos el papel de los *blocking clusters* en relación con el diagrama fundamental y con el desempeño de la evacuación.

En el enlace de la referencia [143] se muestra un vídeo que presenta una animación comparando una simulación sin vestíbulo con otra que incluye un vestíbulo cerrado de 2 puertas.

En la Fig. 6.5 se muestra el flujo de evacuación en función del tamaño total de la puerta del vestíbulo (w). Dado que estamos tratando con vestíbulos de 2 puertas, w ahora representa la suma de las dos puertas de ingreso al vestíbulo. Recordar que en esta tesis solo exploramos vestíbulos simétricos. Es decir, el tamaño de cada puerta es $w/2$.

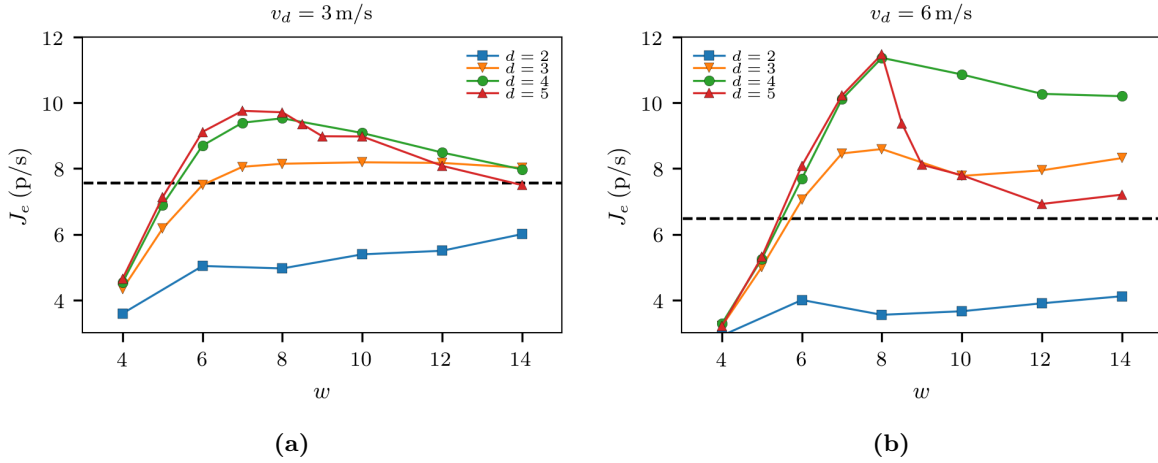


Figura 6.5: Flujo de evacuación en función del ancho total de la puerta del vestíbulo w para vestíbulos cerrados de 2 puertas. Cada curva corresponde a un ancho de vestíbulo diferente d . La línea horizontal indica el flujo para el escenario “sin vestíbulo”. Los datos se promediaron en 30 procesos de evacuación en los que las posiciones y velocidades iniciales se establecieron de forma aleatoria. El número inicial de peatones es $N=200$. (a) la velocidad de deseo es $v_d = 3$ m/s, (b) la velocidad de deseo es $v_d = 6$ m/s.

La Fig. 6.5a corresponde a $v_d = 3$ m/s, mientras que la Fig. 6.5b corresponde a $v_d = 6$ m/s. Cada curva representa un valor d diferente (ver las leyendas para obtener más detalles). El flujo de evacuación sin vestíbulo se muestra mediante la línea horizontal. Como primera inspección, podemos notar que $d = 2$ empeora el rendimiento de evacuación, pero $d = 3$ aumenta el flujo de evacuación hasta alcanzar una meseta por encima de la situación sin vestíbulo (esto es válido para ambas v_d).

En el caso de $v_d = 3$ m/s (Fig. 6.5a), los vestíbulos más anchos ($d = 4$ y $d = 5$) exhiben patrones similares. Valores pequeños de w empeoran el rendimiento de evacuación. Sin embargo, el flujo de evacuación mejora para $w \geq 6$. En ambos casos, las curvas alcanzan un máximo en $w = 8$ y luego reducen el flujo a medida que w aumenta.

En el caso de $v_d = 6$ m/s (Fig. 6.5b), el vestíbulo de tamaño $d = 4$ produce el flujo máximo en $w = 8$. Después de este “pico”, el flujo disminuye lentamente para valores crecientes de w . Vale la pena señalar que, para $w > 6$, el flujo de evacuación es sustancialmente mayor que el flujo de la situación sin vestíbulo.

Si el vestíbulo es más ancho ($d = 5$) y $v_d = 6$ m/s (ver Fig. 6.5b), la curva también presenta un intervalo en el que el flujo de evacuación es mucho mayor que en la situación sin vestíbulo. El “pico” de flujo está alrededor de $w = 8$. El flujo converge al escenario sin vestíbulo a medida que w aumenta.

Es importante remarcar que el vestíbulo de 2 puertas es capaz de mejorar el flujo de evacuación bajo un amplio rango de valores de los parámetros estructurales (d y w).

Curiosamente, el valor de flujo máximo para el vestíbulo de 2 puertas está alrededor de $w = 8$, mientras que el flujo máximo para el vestíbulo de 1 puerta es aproximadamente $w = 6$. Esto significa que una sola puerta de tamaño w produce más flujo que 2 puertas de tamaño $w/2$. Se informaron resultados similares para simulaciones de evacuación de peatones de dos puertas [144] y también para experimentos realizados con medios granulares acelerados por la fuerza de la gravedad [145].

El vestíbulo mejora el flujo de evacuación si se cumplen ciertas condiciones estructurales (valores específicos de d y w). En una primera inspección, el incremento de flujo se puede explicar con la ayuda del diagrama fundamental (flujo vs. densidad). Al igual que hicimos con el vestíbulo de 1 puerta, medimos el flujo de evacuación en función de la densidad. La densidad se midió en el “vestíbulo interior” (el área entre la puerta de salida y la pared del vestíbulo; ver Fig. 6.2).

La Fig. 6.6 muestra el diagrama fundamental para diferentes parámetros estructurales (ver los encabezados y las leyendas de los gráficos). La línea horizontal representa la situación sin vestíbulo. Los marcadores representan diferentes tamaños de puerta de vestíbulo w y cada punto de datos corresponde a una condición inicial diferente.

El vestíbulo más estrecho explorado es $d = 2$. Bajo esta condición, la densidad en el vestíbulo interior permanece muy baja ($\rho < 1$) independientemente del tamaño de la puerta del vestíbulo (ver Fig. 6.6a). La causa de este fenómeno es que los peatones se atascan en la entrada del vestíbulo interior impidiendo que esta zona tenga un mayor número de peatones. La consecuencia directa de este fenómeno es un flujo de evacuación inferior al de la situación sin vestíbulo.

La Fig. 6.6b corresponde a un vestíbulo de 2 puertas y $d = 3$. Si bien esta condición estructural permite un mayor rango de densidad y flujo, solo se observa el régimen de flujo libre. Esto significa que el vestíbulo interior no se abarrota (independientemente del valor de w). Este fenómeno está relacionado con los *blocking clusters* que se producen en el interior del vestíbulo, como se discutirá al final de esta sección.

Para vestíbulos de 2 puertas de tamaño $d = 4$ (Fig. 6.6c), se observa el flujo libre y el “pico” del diagrama fundamental. Esto significa que al aumentar w aumenta la densidad al mismo tiempo que aumenta el flujo de evacuación. Al igual que en el caso de $d = 3$, el vestíbulo interior no se abarrota porque los agentes se atascan (temporalmente) antes de la región del vestíbulo interior.

Si el vestíbulo es más ancho ($d = 5$), es posible observar el flujo libre y el régimen congestionado (Fig. 6.6d). El primero se cumple para $w < 8$, mientras que el segundo aparece para $w > 9$. El régimen congestionado se caracteriza por un flujo decreciente a medida que aumenta la densidad. Un vestíbulo suficientemente ancho ($d = 5$) y un tamaño de puerta de vestíbulo grande ($w > 8$), permiten que una gran cantidad de agentes ingresen al vestíbulo al mismo tiempo. Este es el límite que se asemeja al escenario sin vestíbulo.

Para entender mejor porqué el vestíbulo interior se abarrota dependiendo de d y w , medimos los *blocking clusters*. A diferencia del vestíbulo de 1 puerta, para el vestíbulo de 2 puertas es necesario definir un nuevo tipo de blocking cluster: el “BC vestíbulo”. Éstos se forman adentro

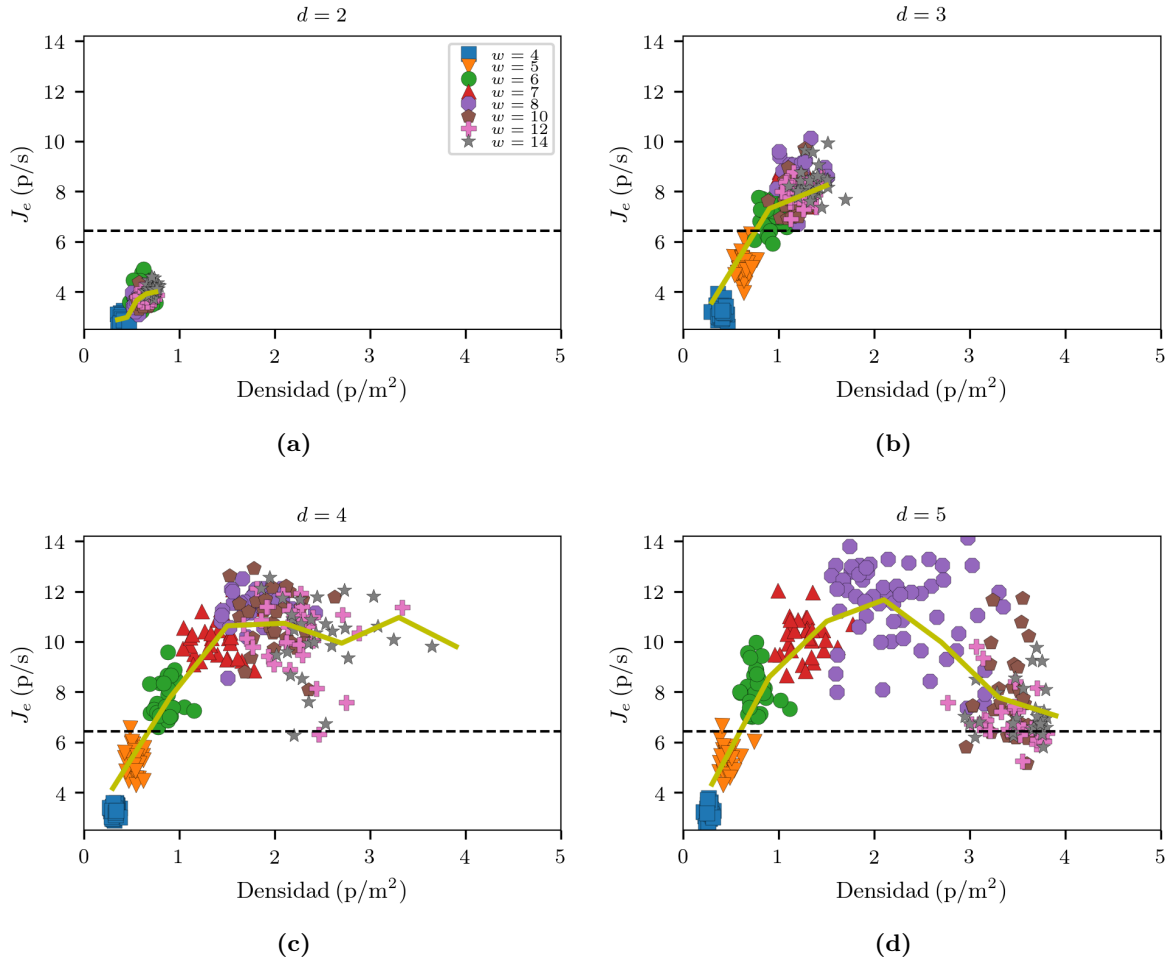


Figura 6.6: Flujo de evacuación en función de la densidad (diagrama fundamental) para vestíbulos de 2 puertas. La densidad se midió en el vestíbulo interior y se promedió hasta el 90 % de individuos evacuados. La línea horizontal en cada gráfico indica el flujo para el escenario “sin vestíbulo”. Cada punto de datos pertenece a un único proceso de evacuación en el que las condiciones iniciales (posiciones y velocidades) se establecieron de forma aleatoria. El número inicial de peatones es $N=200$. La velocidad de deseo es $v_d = 6$ m/s. Ver el encabezado de cada gráfico para conocer el valor correspondiente del ancho del vestíbulo d .

del vestíbulo pero justo antes del vestíbulo interior (ver Fig. 6.7b).

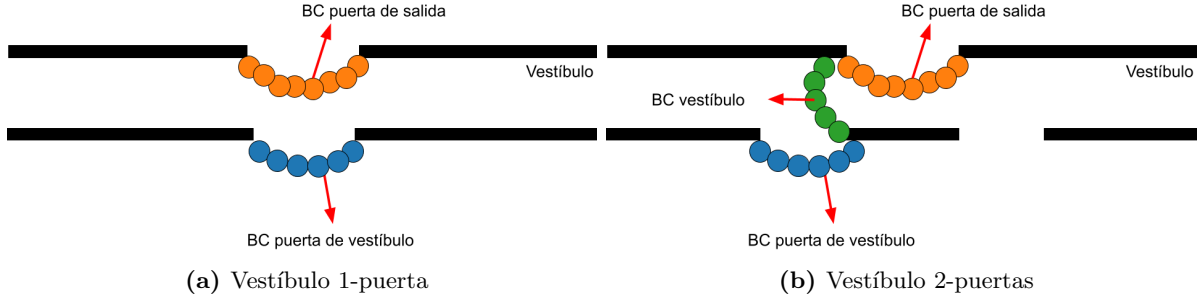


Figura 6.7: Representación de los distintos tipos de *blocking clusters* (BC) según el recinto explorado. (a) vestíbulo de 1-puerta y (b) vestíbulo de 2-puertas.

En resumen, tres tipos de *blocking clusters* juegan un papel relevante:

- Los que se forman en la puerta de salida.
- Los que se forman antes del vestíbulo (en la puerta del vestíbulo).
- Los que se forman dentro del vestíbulo (justo antes del vestíbulo interior).

En la Fig. 6.7b mostramos una ilustración de los tres tipos de *blocking clusters*.

La Fig. 6.8a y la Fig. 6.8b muestran los tres tipos de probabilidades de *blocking cluster* para $d = 3$ y $d = 5$, respectivamente. Como era de esperar, el aumento de w reduce los *blocking clusters* de la puerta del vestíbulo. La principal diferencia entre el caso de $d = 3$ y $d = 5$ es que, en el primero, la curva de BC de “vestíbulo” (en color verde) está por encima de la curva de la “puerta de salida” (en color naranja). Por otro lado, para $d = 5$, la curva de la “puerta de salida” (naranja) está muy por encima de la curva del “vestíbulo” (verde).

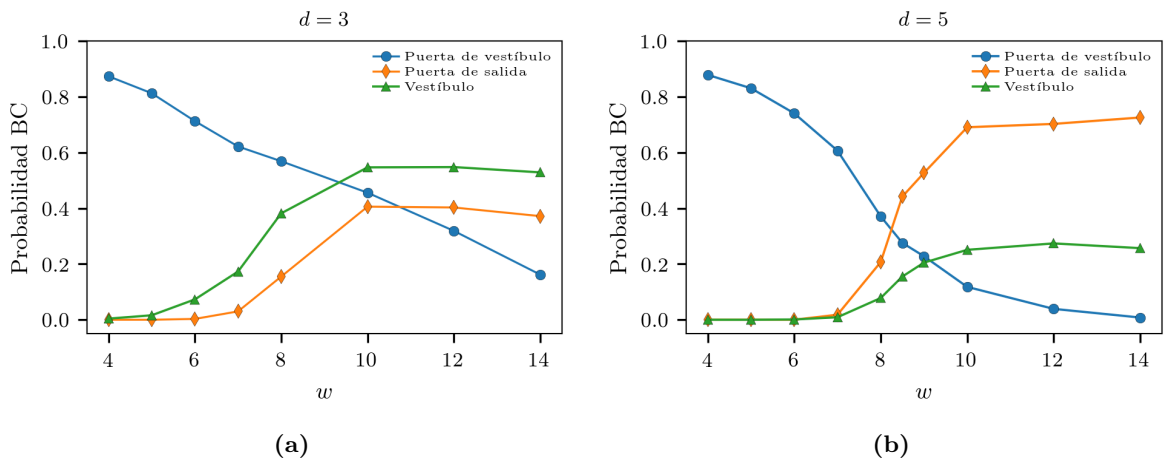


Figura 6.8: Probabilidad de formar *blocking clusters* en función del ancho de la puerta del vestíbulo w . Consulte la leyenda para el tipo de *blocking cluster* considerado. La probabilidad se define como la fracción de tiempo que un *blocking cluster* está presente sobre el tiempo total de evacuación. El número inicial de peatones es $N=200$. La velocidad de deseo es $v_d = 6$ m/s. (a) Para ancho de vestíbulo $d = 3$, (b) Para ancho de vestíbulo $d = 5$.

Las curvas de *blocking clusters* explican las diferencias en el diagrama fundamental. $d = 3$ aumenta la probabilidad de formar *blocking clusters* antes del vestíbulo interior. Estos BC evitan que el vestíbulo interior se abarrote. Esta es la razón por la cual el diagrama fundamental en $d = 3$ solo muestra flujo libre (y baja densidad). La consecuencia directa de la baja densidad es la ausencia de *blocking clusters* en la puerta de salida. Por lo tanto, el flujo de evacuación es mayor que la condición sin vestíbulo.

El escenario de $d = 5$ produce menos *blocking clusters* previos al vestíbulo interior. De esta forma, el vestíbulo interior se abarrota más fácilmente. Esta es la razón por la cual el diagrama fundamental en $d = 5$ exhibe un régimen congestionado (para w lo suficientemente grande). La consecuencia es un aumento en la probabilidad de bloqueo en la puerta de salida, lo que reduce el flujo de evacuación.

Para finalizar esta sección, destacamos que el flujo de evacuación en el vestíbulo de 2 puertas es fuertemente dependiente de la densidad. Sin embargo, es posible controlar la densidad del vestíbulo interior con los parámetros estructurales d y w . El flujo se maximiza para valores de densidad intermedios ($\rho \sim 2,5$ p/m²). Este resultado es equivalente al obtenido para vestíbulos cerrados de 1 puerta y para vestíbulos abiertos. $\rho \sim 2,5$ p/m² es la máxima densidad posible tal que se formen pocos *blocking clusters* en la puerta de salida. Si la densidad fuese mayor, entonces se formarían demasiados BC en la puerta de salida. Si la densidad fuese menor, entonces se desaprovecharía el espacio disponible en la vecindad de la puerta de salida y la evacuación sería ineficiente.

6.6. La presión

En la sección anterior mostramos que bajo ciertas condiciones estructurales incorporar un vestíbulo en la salida aumenta el flujo de evacuación. Una preocupación es si la mejora en el flujo es a expensas de un aumento en la presión que sufren los individuos que escapan. Esta posibilidad surge porque el vestíbulo se logra mediante la colocación de obstáculos tipo panel y estos obstáculos podrían causar un aumento de presión debido a la interacción individuo-obstáculo e individuo-individuo.

En el capítulo 3 exploramos el rol del parámetro k_n , en el capítulo 4 lo calibramos usando datos empíricos de una estampida humana (*Black Friday*). Como mostramos en el capítulo 3, este parámetro es fundamental porque condiciona el nivel de *overlap* que surge cuando dos individuos entran en contacto. Es por eso que calibrarlo apropiadamente permite tener una idea más correcta del grado de *overlap* entre dos o más agentes en contacto.

En esta sección, reportamos el *overlap* entre agentes como un indicador de la presión. El *overlap* en la i -ésima partícula se define como $o_i = \sum_j g(R_{ij} - r_{ij})$ donde $R_{ij} = R_i + R_j$ es la suma de los radios de las partículas i y j . r_{ij} es la distancia entre los centros de masa. j representa cualquier partícula (o pared). Como mencionamos en el capítulo 2, la función $g(\cdot)$ toma el valor del argumento cuando hay contacto entre individuos y es nula en caso contrario.

De esta forma, el *overlap* refleja el grado de cercanía entre peatones. Advertimos al lector que en esta sección, usamos los términos *overlap* y presión de manera intercambiable.

Aunque el *overlap* no es la única forma de cuantificar la presión en una multitud [116, 125, 130], afirmamos que cualquier medida razonable de presión debería estar correlacionada con esta magnitud. Apoyamos este argumento porque las fuerzas que actúan en la dirección normal

son funciones monótonamente crecientes del *overlap*.

Nuestros resultados muestran que la presencia de un vestíbulo reduce significativamente la presión sobre los peatones. Como primera aproximación, mostramos tres *snapshots* de evacuaciones para tres diseños diferentes: sin vestíbulo (Fig. 6.9a), vestíbulo de 1 puerta (Fig. 6.9b) y vestíbulo de 2 puertas (Fig. 6.9c). Cada círculo representa un peatón simulado. El color de cada agente refleja el nivel de *overlap*.

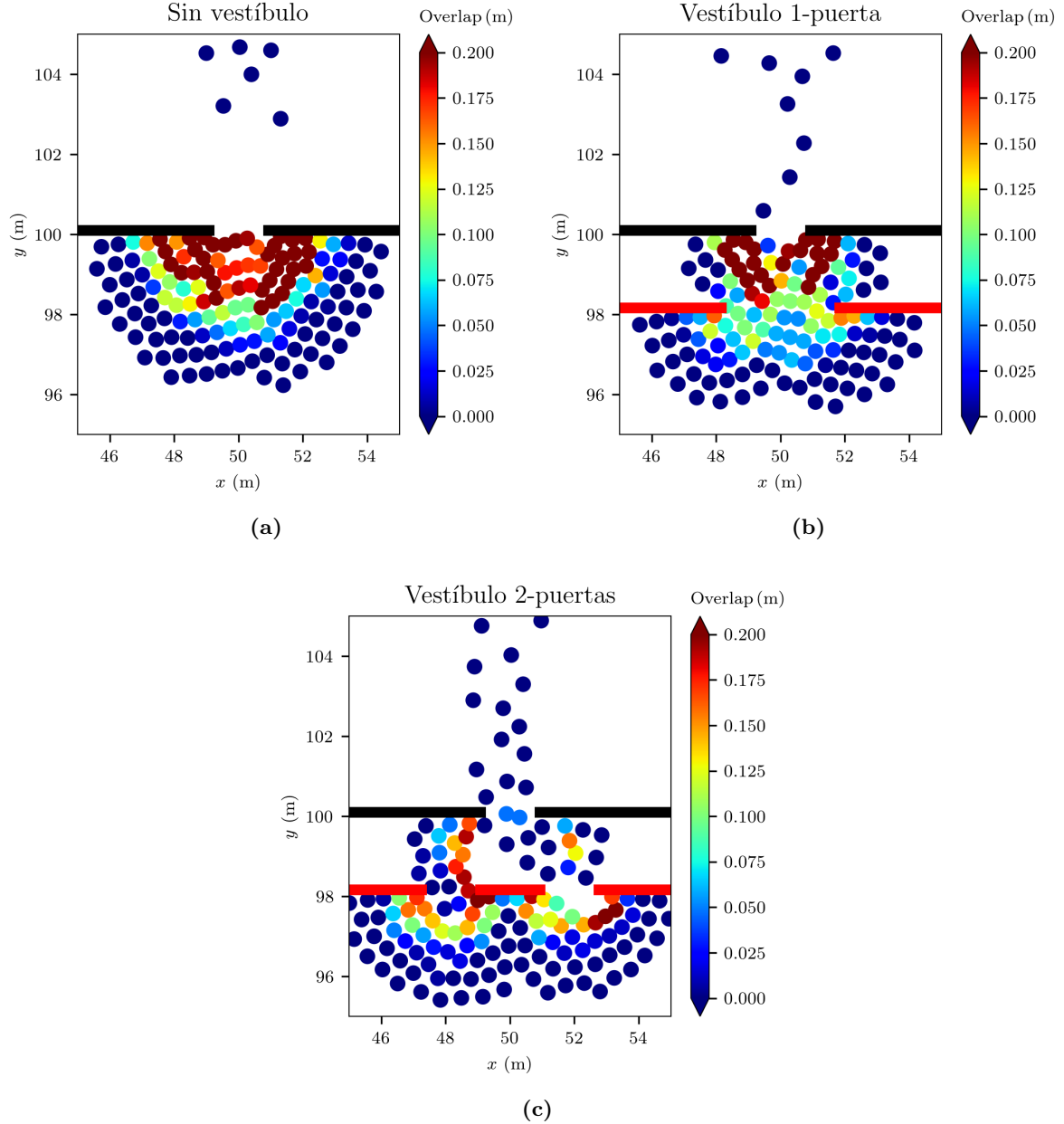


Figura 6.9: *Snapshots* de las simulaciones numéricas en $t = 7$ s y $v_d = 6$ m/s. Los círculos representan a los peatones simulados. El color de cada agente representa el nivel de *overlap* (consulte la escala a la derecha). El encabezado de cada gráfico indica el tipo de vestíbulo. Los tres escenarios mostrados comienzan con las mismas condiciones iniciales (posiciones y velocidades) para $N=200$ peatones. El ancho de la puerta del vestíbulo es $w = 8$ en todos los casos.

Es fácil observar que la situación sin vestíbulo exhibe la mayor presión entre las tres situaciones exploradas. El vestíbulo de 1 puerta produce una presión más baja que la situación sin vestíbulo. Mientras que el vestíbulo de 2 puertas produce incluso menos presión que el vestíbulo de 1 puerta

(ver Fig. 6.9).

Dos razones explican la reducción de presión producida por el vestíbulo. La primera razón es que la interacción en las puertas del vestíbulo reduce la velocidad de los peatones dentro de la región del vestíbulo (lo que reduce la presión). En otras palabras, las puertas del vestíbulo alivian la fuerza que soportan los peatones que escapan en la salida. Este fenómeno explica la diferencia entre el escenario sin vestíbulo y la situación con vestíbulo.

La segunda razón que explica la reducción de la presión es la dispersión de la multitud. Cuanto más “diluida” esté la multitud, menor será la presión que soportan los individuos. El escenario de 2 puertas muestra una multitud más diluida en la zona previa al vestíbulo. En otras palabras, el vestíbulo de 2 puertas “obliga a la multitud” a dividirse en dos mitades (una para cada puerta), lo que produce una reducción general de la densidad (por lo tanto, una reducción de la presión). El parámetro w es el factor clave para controlar cuan diluida está la multitud.

Los resultados de la Fig. 6.9 corresponden a un instante de tiempo particular ($t = 7$ s). Un aspecto a tener en cuenta es si la disminución de presión inducida por el vestíbulo se mantiene durante todo el proceso de evacuación. Para abordar este problema, medimos el *overlap* (en regiones específicas) en función del tiempo (ver Fig. 6.10).

Aunque en la región “lejos de la salida” la situación “sin vestíbulo” produce más presión que el escenario con vestíbulo, la región “cerca de la salida” muestra una disminución sustancial de la presión debido a la presencia del vestíbulo (véanse las flechas verticales). Este resultado es válido en el vestíbulo de 1 puerta y en el vestíbulo de 2 puertas para casi todo el proceso de evacuación. Vale la pena señalar que el vestíbulo de 2 puertas produce una reducción de presión más pronunciada que la condición de vestíbulo de 1 puerta.

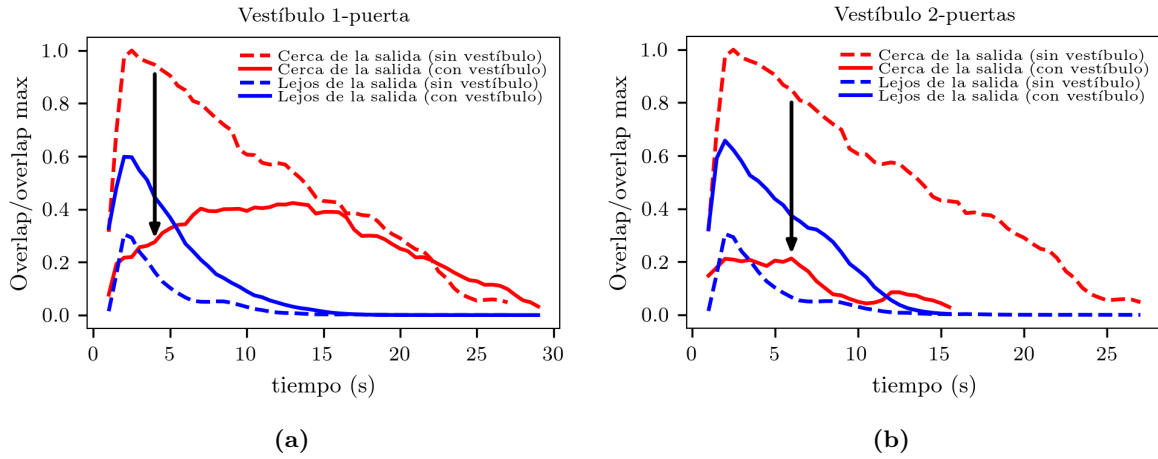


Figura 6.10: *overlap* en función del tiempo. El eje vertical está normalizado por el *overlap* máximo. Cada curva corresponde a una condición de medición diferente. Las líneas continuas corresponden a escenarios de vestíbulo y las líneas discontinuas a escenarios sin vestíbulo. El color rojo corresponde al área cerca de la región de salida, mientras que el color azul corresponde al área lejos de la región de salida. La flecha vertical indica la disminución de la presión por incluir el vestíbulo. Las series temporales se suavizaron para eliminar el ruido. Cada figura corresponde a una condición de vestíbulo diferente (ver los encabezados). El ancho de la puerta del vestíbulo es $w = 8$ en todos los casos. Las regiones “cerca de la puerta” y “lejos de la puerta” se ilustran en la figura A.1 (ver apéndice A).

Calculamos el *overlap* medio para cuantificar la presión de la multitud para diferentes condiciones estructurales (variando d y w). Esta métrica es el *overlap* promediado sobre todos los individuos y a lo largo del tiempo en diferentes condiciones iniciales. La figura 6.11 muestra el *overlap* medio en función de w para diferentes anchos de vestíbulo d . La Fig. 6.11a corresponde

al vestíbulo de 1 puerta y la Fig. 6.11b corresponde al vestíbulo de 2 puertas. La línea horizontal representa el *overlap* medio para la situación sin vestíbulo.

Para todas las condiciones exploradas, el vestíbulo produce un *overlap* medio más bajo que la situación sin vestíbulo (todas las curvas se encuentran por debajo de la línea horizontal en la Fig. 6.11). El escenario del vestíbulo de 2 puertas (Fig. 6.11b) exhibe menos presión que el escenario del vestíbulo de 1 puerta (Fig. 6.11a) para cualquiera de las condiciones estructurales exploradas. A grandes rasgos, el vestíbulo de 2 puertas muestra un *overlap* medio decreciente a medida que aumenta w , mientras que el vestíbulo de 1 puerta presenta un comportamiento casi constante para cualquier valor de w .

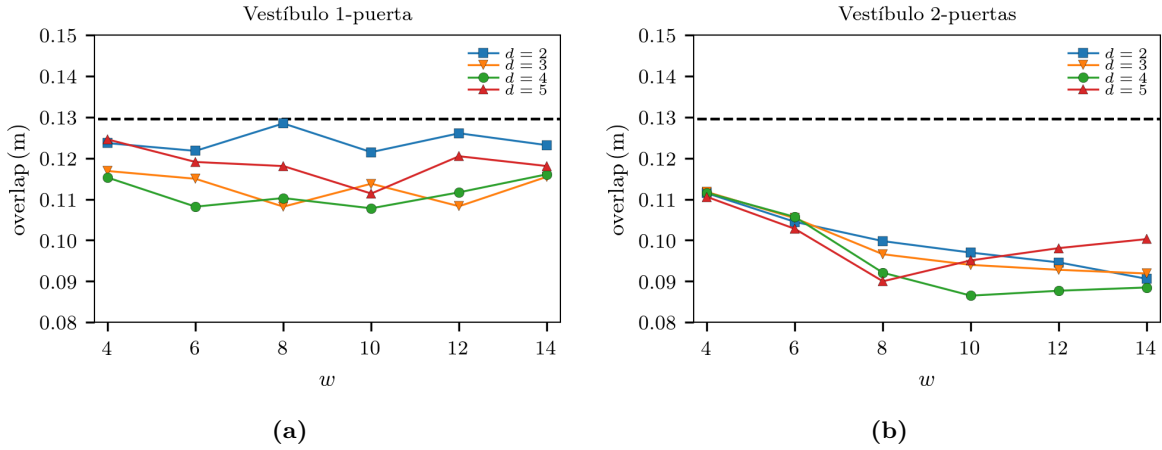


Figura 6.11: *overlap* medio de la multitud en función de w para diferentes anchos de vestíbulo d . La línea horizontal representa el *overlap* medio de la situación sin vestíbulo. Los valores de *overlap* se promedian a lo largo del tiempo para 30 condiciones iniciales diferentes. Las simulaciones terminaron cuando 180 agentes abandonaron la habitación. El número inicial de agentes es $N=200$ y la velocidad de deseo es $v_d = 6$ m/s.

Un fenómeno a tener en cuenta es que el vestíbulo de 1 puerta no diluye significativamente a la multitud a medida que aumenta w . Esto ocurre porque la multitud no se divide en dos mitades (como sí ocurre en el escenario de 2 puertas). Esta es la razón por la cual el *overlap* exhibe un patrón casi constante en la Fig. 6.11a (que corresponde a un vestíbulo de 1 puerta).

Aunque los resultados presentados en la Fig. 6.11 corresponden a $v_d = 6$ m/s, obtuvimos patrones similares para velocidades de deseo en el intervalo $v_d > 2,5$ m/s. Destacamos que, además de la interacción peatón-peatón, en este análisis se tiene en cuenta la interacción peatón-pared.

Al evaluar la peligrosidad de la presión a la que están expuestos los individuos, es importante considerar tanto la presión promedio como las presiones más elevadas. Por lo tanto, calculamos la fracción de individuos expuestos a presiones peligrosas en función de v_d .

Para determinar si un agente está expuesto a un nivel de presión peligroso, es necesario establecer un *overlap* crítico. Si un individuo supera este *overlap* crítico, se considera que está expuesto a una presión peligrosa.

El *overlap* crítico se define según el criterio propuesto por Evans y Hayden [146], que establece que una fuerza de 507 N aplicada en el pecho es una fuerza que los individuos no pueden soportar ni siquiera durante unos pocos segundos. Este valor de 507 N se corresponde con un *overlap* de 0,14 m, que consideramos como el *overlap* crítico.

En la Fig. 6.12 se muestra la fracción de individuos expuestos a presiones peligrosas en función de la velocidad de deseo. Cada curva corresponde a una condición estructural diferente: recinto

sin vestíbulo, con vestíbulo de una puerta y con vestíbulo de dos puertas (ver las leyendas en los gráficos). La Fig. 6.12a corresponde a $w = 3$ y la Fig. 6.12b corresponde a $w = 5$.

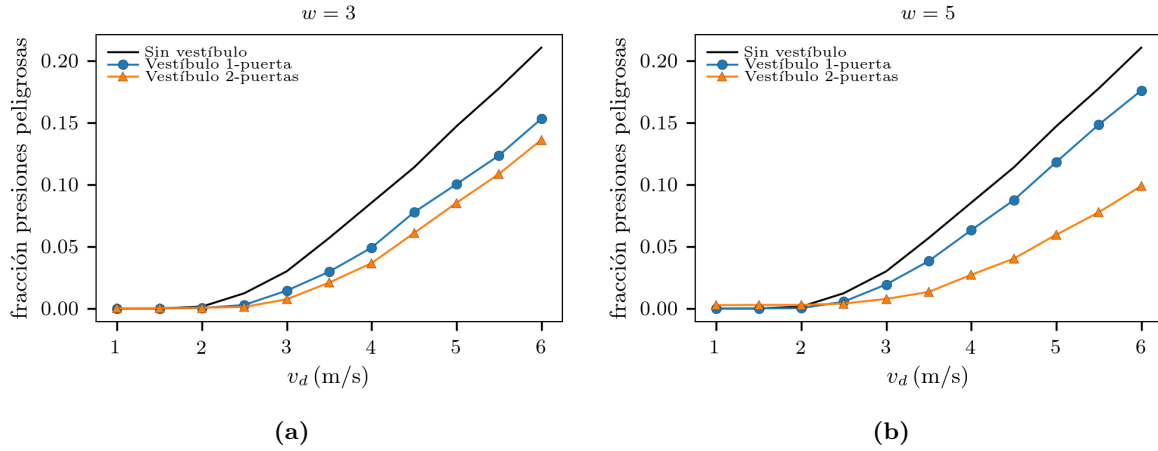


Figura 6.12: Fracción de individuos expuestos a presiones peligrosas en función de la velocidad de deseo. El overlap crítico es 0,14 m. Las curvas son el resultado de promediar a lo largo del tiempo y 30 condiciones iniciales diferentes. El número inicial de individuos es $N=200$. Las simulaciones corrieron hasta evacuar el 90 % de los individuos.

Para todas las condiciones analizadas, el recinto con vestíbulo de una puerta muestra una menor fracción de individuos expuestos a presiones peligrosas en comparación con la situación sin vestíbulo. Pero lo más importante a destacar es que el vestíbulo de dos puertas es la condición que genera la menor presión peligrosa.

En particular, cuando se compara el vestíbulo de dos puertas con $w = 5$ y $w = 3$, se observa que $w = 5$ genera mucha menos presión. Esto se debe a que al estar las puertas de ingreso al vestíbulo más alejadas, se obliga a la multitud a dispersarse más, reduciendo así la densidad local y, por ende, la probabilidad de exposición a altos valores de presión.

Los resultados anteriores se pueden resumir de la siguiente manera. Nuestras simulaciones numéricas indican que la presencia de un vestíbulo reduce la presión general en la multitud. Este resultado es válido para cualquiera de las condiciones estructurales (variando w y d). Destacamos que, de las condiciones exploradas, el vestíbulo de 2 puertas es la forma más efectiva de reducir la presión en la multitud. La clave de esta reducción de presión tiene dos componentes. Por un lado, la presencia del vestíbulo reduce la densidad en la zona de la puerta de salida. Por otro lado, el aumento del parámetro w permite dispersar la multitud, reduciendo así la densidad en la zona previa al vestíbulo.

6.7. Comparación: vestíbulo abierto vs. vestíbulo cerrado

En el capítulo 5 investigamos los vestíbulos abiertos, mientras que este capítulo investigamos los vestíbulos cerrados. Si comparamos los resultados de flujo de evacuación de ambos recintos, podemos concluir que el vestíbulo cerrado es capaz de superar el flujo de la situación “sin vestíbulo” para una mayor cantidad de condiciones estructurales (un mayor rango de d y w).

En el caso del vestíbulo abierto, solo se obtienen valores $J \sim 10p/s$ para los vestíbulos con 3 puertas ($d = 2$ y $3 \leq gap \leq 5$). Por otro lado, para el vestíbulo cerrado existe una mayor diversidad de condiciones estructurales que producen valores de flujo del orden de $J \sim 10p/s$.

En este capítulo hemos demostrado que el vestíbulo cerrado de 2 puertas produce mejores evacuaciones que el vestíbulo cerrado de 1 puerta. Los vestíbulos cerrados de 2 puertas tienen dos instancias donde se pueden formar *blocking clusters* antes de llegar al vestíbulo interior. Estas instancias son la puerta de ingreso al vestíbulo y el interior del mismo del vestíbulo. Esto permite que la densidad en el vestíbulo interior alcance valores intermedios de forma sostenida. En cambio, el vestíbulo abierto tiene solo una instancia donde se forman *blocking clusters* antes de la zona de la puerta de salida. Este hecho hace que las densidades intermedias del vestíbulo abierto no se mantengan en el tiempo. Es por eso que, de todos los recintos explorados, el vestíbulo cerrado de 2 puertas se presenta como la mejor opción.

6.8. Conclusiones

Proponemos diseños arquitectónicos para mejorar el rendimiento de las evacuación en situaciones de emergencia. Realizamos simulaciones numéricas, para recrear una multitud evacuando una habitación bajo una situación de alto estrés ($v_d \geq 3$ m/s).

Exploramos tres condiciones: el escenario sin vestíbulo, el escenario con vestíbulo de 1 puerta y el escenario con vestíbulo de 2 puertas. Los parámetros estructurales que caracterizan los vestíbulos son d (el ancho del vestíbulo) y w (el ancho total de la puerta de ingreso al vestíbulo). Encontramos que una elección adecuada de estos parámetros puede aumentar sustancialmente el flujo de evacuación.

El flujo de evacuación óptimo ($J \sim 11$ p/s) se consigue en:

- $d = 4$, $w = 6$ para el vestíbulo de 1 puerta.
- $d = 4$, $w = 8$ para el vestíbulo de 2 puertas.

Esta es una mejora notable considerando que el escenario sin vestíbulo produce $J \sim 6,5$ p/s (para $v_d = 6$ m/s en todos los casos).

Al igual que en el caso de los vestíbulos abiertos, la clave para comprender este fenómeno es que d y w controlan la densidad en la región del vestíbulo interior. Los valores bajos de densidad ($\rho \sim 1$ p/m²) producen un flujo de evacuación subóptimo porque queda espacio sin usar cerca de la puerta de salida. Este estado hace que la multitud evacúe “a cuentagotas”.

Valores intermedios de densidad ($\rho \sim 2,5$ p/m²) maximizan el flujo de evacuación debido a que el vestíbulo interior recibe la mayor cantidad posible de peatones sin producir demasiados *blocking clusters* en la puerta de salida. En el caso contrario, valores altos de densidad ($\rho \sim 4$ p/m²), generan un flujo de evacuación subóptimo porque aumenta la probabilidad de producir *blocking clusters* en la salida.

Otro logro importante de los recintos con vestíbulo es la reducción de presión (en comparación con el escenario sin vestíbulo). Aunque los dos escenarios explorados en este capítulo (vestíbulo de 1 puerta y de 2 puertas) reducen la presión de la multitud, es el vestíbulo de 2 puertas el que reduce más la presión. Este fenómeno ocurre porque aumentar w en este diseño obliga a la multitud a dispersarse más (reduciendo así la densidad local en el área previa al vestíbulo).

Por último, es importante destacar que este tipo de mejoras estructurales no requieren que los individuos reciban instrucciones específicas para lograr una evacuación exitosa. Es el mismo diseño arquitectónico el que induce a la multitud a evacuar de forma más rápida y segura.

Capítulo 7

Conclusiones y perspectivas

Los objetivos de esta tesis fueron mejorar el modelo de fuerza social (enfaticando un método de trabajo que ponga relevancia al análisis empírico) y, una vez mejorado el modelo, proponer soluciones a las evacuaciones en estado de pánico. La tesis puede dividirse en tres etapas cuyas conclusiones serán descriptas a continuación.

La primer etapa de la tesis consistió en explorar el rol de las fuerzas de contacto entre individuos (la fuerza de fricción y la fuerza de repulsión corporal). Exploramos el parámetro de rigidez k_n del modelo de fuerza social. Estudiamos los efectos de variar este parámetro en dos tipos de recintos diferentes: recintos tipo cuello de botella (“*bottleneck*”) y recintos tipo pasillo.

En el recinto tipo *bottleneck*, el tiempo de evacuación disminuye (los peatones se mueven más rápido) a medida que aumenta el coeficiente de rigidez (k_n) para todas las velocidades de deseo exploradas. Este fenómeno ocurre por dos motivos. En primer lugar, aumentar k_n disminuye el número de contactos y el *overlap* entre individuos. En consecuencia, esto disminuye la intensidad de fricción entre individuos. En segundo lugar, aumentar k_n reduce la probabilidad de formar *blocking clusters* en la puerta de salida. Ambos efectos conducen a una dinámica de evacuación más rápida.

El recinto tipo pasillo produce el comportamiento opuesto (a mayor rigidez, menor velocidad). En el pasillo, el movimiento de los peatones está limitado por las paredes laterales. Por lo tanto, si el nivel de rigidez es suficientemente alto, toda la multitud se ordena en una red (como un sólido cristalino). El perfil de velocidad pasa a ser uniforme y con una menor velocidad media que está determinada por la interacción con las paredes.

La segunda etapa de la tesis consistió en poner a prueba y calibrar los parámetros del modelo. Para esto fue necesario obtener datos empíricos de una situación que se asemeja a una evacuación de emergencia (estampida del *Black Friday*). Medimos el flujo y obtuvimos un valor de $\langle J \rangle = 6,7 \pm 0,8$ p/s.

Hicimos simulaciones numéricas que recrean la estampida humana del *Black Friday*. Utilizamos diferentes conjuntos de parámetros que fueron previamente propuestos/utilizados en la literatura. Los conjuntos de parámetros calibrados a partir de experimentos controlados en laboratorio, o situaciones en las que el contacto físico es insignificante, produjeron simulaciones que muestran un fuerte desacuerdo con nuestras mediciones empíricas. Estos conjuntos de parámetros no son adecuados para analizar situaciones de alta ansiedad (como puede ser una evacuación en estado de pánico) porque estas calibraciones subestiman la contribución de la fricción.

Implementamos un algoritmo de Evolución Diferencial para obtener mejores valores de los parámetros k_n y k_t . El criterio de optimización fue minimizar la diferencia entre la curva de descarga simulada y la curva de descarga empírica. Los valores que producen el mejor ajuste son: $(k_n; k_t) = (0,0364 \times 10^5; 3,05 \times 10^5)$, para $v_d = 5$ m/s. Estos valores reproducen apropiadamente el comportamiento cualitativo y cuantitativo de la medición empírica.

Una vez obtenido el conjunto de parámetros óptimo pasamos a la tercera etapa de la investigación. En esta etapa proponemos soluciones al problema de las evacuaciones en estado de pánico. Exploramos recintos con vestíbulos abiertos y vestíbulos cerrados. Encontramos que los vestíbulos son capaces de aumentar el flujo de evacuación y disminuir la presión que soportan los individuos al evacuar.

En cuanto al vestíbulo abierto, exploramos vestíbulos de 2 y 3 puertas. Variamos el ancho del vestíbulo d , el coeficiente de fricción de la pared k_w y el tamaño de la puerta intermedia gap (en el caso del vestíbulo de 3 puertas). Encontramos que la densidad dentro del vestíbulo determina el flujo de evacuación. Si el vestíbulo se atasca (por la alta densidad), el flujo disminuye. Si la densidad es demasiado baja, el flujo también está en una situación subóptima ya que queda espacio sin usar en el vestíbulo interior (los individuos salen a “cuentagotas”). Por otro lado, valores intermedios de densidad ($\rho \sim 2$ p/m²) maximizan el flujo de evacuación.

Reducir d o aumentar k_w disminuyen la densidad en el vestíbulo. Este fenómeno se explica por los *blocking clusters* que aparecen en las entradas del vestíbulo. Éstos limitan el acceso al mismo. De igual manera, la reducción del espacio entre los dos paneles (gap) también disminuye la densidad.

En cuanto al vestíbulo cerrado, exploramos vestíbulos de 1 y 2 puertas. Variamos el ancho del vestíbulo d y el tamaño total de las puertas de ingreso al mismo (w). Al igual que en el vestíbulo abierto, el flujo de evacuación queda determinado por la densidad en el vestíbulo interior. El flujo de evacuación se maximiza cuando se obtienen valores intermedios de densidad, los cuales pueden ser precisamente controlados por los parámetros estructurales d y w .

Otro logro importante de los recintos con vestíbulo es la reducción de presión (en comparación con el escenario sin vestíbulo). El vestíbulo cerrado de 2 puertas es el que reduce más la presión. Este fenómeno ocurre porque aumentar w , en este diseño, obliga a la multitud a dispersarse más (reduciendo así la densidad local en el área previa al vestíbulo).

Es importante destacar que este tipo de mejoras estructurales no requieren que los individuos reciban instrucciones específicas para lograr una evacuación exitosa. Es decir, es una solución basada en la arquitectura y no en el comportamiento. Es el mismo diseño arquitectónico el que induce a la multitud a evacuar de forma más rápida y más segura. Esta propuesta podría ser beneficiosa considerando que el comportamiento humano en situaciones de emergencia puede estar dominado por el pánico a pesar de los enormes esfuerzos por evitar que esto suceda.

Creemos que el trabajo realizado a lo largo de esta tesis puede mejorar sustancialmente las evacuaciones de emergencia. Si bien todavía faltan comprobaciones empíricas que pongan a prueba nuestras soluciones, consideramos que el conocimiento aquí generado es lo suficientemente robusto como para brindar resultados positivos. Esperamos que esta tesis sea una fuente de inspiración para futuras investigaciones y futuras implementaciones prácticas que mejoren la seguridad en eventos multitudinarios.

7.1. Perspectivas a mediano plazo

A continuación presentamos una lista de posibles líneas de investigación que darán resultados prometedores a mediano plazo. Algunas de ellas ya están en curso pero son muy incipientes. Otras líneas aún no cuentan con el impulso que merecen.

- **Optimización de arquitectura:** en los últimos capítulos de esta tesis hemos mostrado que los vestíbulos son estructuras capaces de mejorar las evacuaciones de emergencia porque incrementen el flujo de evacuación y reducen la presión que soportan los individuos. Sería muy valioso estudiar estructuras arquitectónicas más complejas. Hay que tener en cuenta que los diseños arquitectónicos más sofisticados exigen un mayor número de parámetros estructurales (por ejemplo, la cantidad de puertas, el tamaño de cada puerta, la simetría respecto de la puerta de salida, el gap entre puertas, etc.). Al haber más parámetros estructurales el espacio de búsqueda de un diseño óptimo se vuelve más complejo. Es por eso que sería recomendable usar algoritmos de optimización capaces de encontrar recintos que mejoren aun más el desempeño de las evacuaciones.
- **Experimentación:** para obtener una validación completa de los resultados aquí presentados es determinante tener una comprobación experimental/empírica. Realizar experimentos de evacuaciones es complejo y presenta limitaciones. De todas formas, sería muy valioso realizar experimentos para tener una primera aproximación a lo que ocurriría durante una evacuación de emergencia. En línea con lo anterior, sería interesante incorporar vestíbulos en recintos muy concurridos (como terminales de ferrocarril) para comenzar a tener una idea empírica de los potenciales efectos positivos y negativos de esta arquitectura (aun para situaciones donde los individuos no estén ansiosos).
- ***Herdin*g:** los individuos que no ven la puerta de salida (ya sea porque están muy lejos o porque hay visibilidad reducida) deben adoptar una estrategia más compleja para evacuar un recinto. Es posible que algunos adopten una estrategia de “*herdin*g”, es decir, imitar el movimiento de los individuos que tienen a su alrededor. Otros pueden moverse de forma aleatoria hasta encontrar la salida. Vale la pena explorar cómo estos fenómenos más complejos afectan las evacuaciones en presencia de vestíbulos.
- **Probabilidad de tropiezos:** en una multitud, los gradientes de densidad y velocidad pueden ocasionar tropiezos en los individuos. Estos tropiezos pueden volverse peligrosas avalanchas que ocasionan apilamientos humanos. Antes de llevar a la práctica una nueva solución arquitectónica (como lo son los vestíbulos), habría que evaluar cómo estas propuestas repercuten en la probabilidad de tropiezos de los individuos.
- ***Tracking*:** en los últimos años se han desarrollado algoritmo de *computer vision* capaces de detectar peatones en situaciones de alta densidad. Esto antes debía hacerse a mano o con software muy impreciso. El uso de esta tecnología será de gran utilidad para extraer trayectorias de individuos en situaciones de peligro (como en evacuaciones de emergencia que estén filmadas). De esta forma, podremos aprender más acerca de la conducta y el movimiento de los seres humanos ante este tipo de situaciones. Esto servirá para perfeccionar los modelos de dinámica peatonal en general.

7.2. Perspectivas a largo plazo

A continuación presentamos una lista de líneas de investigación que podrían tener impacto dentro de unos años. Algunas de estas propuestas aun no cuentan con el avance tecnológico suficiente, pero es probable que dentro de unos años se vuelva normal lo que hoy parece sofisticado.

- **Vestíbulos removibles:** pueden existir situaciones donde los vestíbulo no mejoren las evacuaciones (cuando v_d o N no son suficientemente grandes). Para obtener un mayor rango de posibilidades de eficiencia en la evacuación, podría explorarse la idea de incorporar vestíbulos removibles. Un dispositivo plausible es el de vestíbulos telescópicos. Es decir, que los paneles que forman el vestíbulo entren y salgan desde el piso. Lo ideal sería que estos paneles estén presentes únicamente cuando mejoren la evacuación y se oculten (bajo tierra) cuando la evacuación sea mejor sin su presencia. Esta idea fue esbozada por Helbing pero nunca fue debidamente explorada [51].
- **Robots guías:** el campo de la robótica ha crecido mucho en los últimos años. En los próximos años podría empezar a evaluarse la posibilidad de utilizar robots rescatistas o que formen parte del personal que gestiona multitudes. Los robots podrían soportar situaciones adversas que los rescatistas humanos no serían capaces de soportar. Como por ejemplo, altas presiones, altas temperaturas y humo. En resumen, el accionar de los robots podría contribuir tanto en el guiado de multitudes en situaciones no riesgosas, como en los rescates de individuos en situaciones peligrosas.
- **Desarmar una pila humana:** a pesar de que se tomen todos los recaudos para que la evacuación sea segura y rápida, nunca deja de existir la posibilidad que se forme una avalancha y queden personas apiladas unas encima de otras sin poder moverse. Hoy en día se sabe muy poco acerca de cómo desarmar un apilamiento humano. Es importante destacar que cada segundo cuenta a la hora de rescatar a individuos que se encuentran expuestos a presiones fatales. Es por eso que sería muy útil desarrollar técnicas que sean capaces de hacer más efectivo el proceso de rescate en situaciones de estas características.

A lo largo de esta tesis hemos publicado en distintas revistas los siguientes artículos:

- **2022** I.M. Sticco, G.A. Frank, C.O. Dorso, Faster and safer evacuations induced by closed vestibules, arXiv:2209.13800.
- **2022** I.M. Sticco, G.A. Frank, C.O. Dorso, Improving competitive evacuations with a vestibule structure designed from panel-like obstacles in the framework of the Social Force Model, Safety science 146, 105544.
- **2022** E.A. Rozan, G.A. Frank, F.E. Cornes, I.M. Sticco, C.O. Dorso, Microscopic dynamics of escaping groups through an exit and a corridor, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 597, 127271.
- **2021** I.M. Sticco, G.A. Frank, C.O. Dorso, Social force model parameter testing and optimization using a high stress real-life situation, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 561, 125299.
- **2020** I.M. Sticco, G.A. Frank, C.O. Dorso Effects of the body force on the pedestrian and the evacuation dynamics, Safety science 129, 104829.
- **2020** I.M. Sticco, G.A. Frank, F.E. Cornes, C.O. Dorso A re-examination of the role of friction in the original Social Force Model, Safety science 121, 42-53.
- **2017** I.M. Sticco, F.E. Cornes, G.A. Frank, C.O. Dorso, Beyond the faster-is-slower effect, Physical Review E 96 (5), 052303.

Apéndices

Apéndice A

Simulaciones numéricas

Las simulaciones numéricas son una componente fundamental de esta tesis. En este apéndice detallamos cómo fueron realizadas las simulaciones numéricas que nos permitieron estudiar las evacuaciones en estado de pánico.

Todas las simulaciones fueron realizadas con LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator) [147]. LAMMPS es un programa, con lenguaje de programación propio, orientado a realizar simulaciones de dinámica molecular. Cuenta con rutinas altamente optimizadas que permiten realizar integraciones numéricas (como el algoritmo de verlet en velocidades). A los módulos básicos de LAMMPS le agregamos módulos propios para incluir las fuerzas del modelo de fuerza social. Estos módulos fueron escritos en C++ por el grupo de investigación.

Sobre cada individuo simulado actúan las fuerzas del modelo de fuerza social. Como el sistema estudiado es un sistema clásico, las trayectorias fueron obtenidas a partir de la integración de una ecuación de Newton (ver Ec. 2.9). Utilizamos el algoritmo de Verlet en velocidades para realizar dicha integración [41]. El paso de integración es de $\Delta t = 10^{-4}$ s que es un paso suficientemente chico para evitar saltos discretos y, al mismo tiempo, suficientemente grande como para evitar simulaciones excesivamente largas. Utilizamos el algoritmo de listas de vecinos para hacer más eficientes los cálculos.

A continuación describimos las condiciones de simulación de cada uno de los capítulos de esta tesis.

A.1. Simulaciones numéricas del Capítulo 3

En este capítulo utilizamos los valores de los parámetros del modelo de fuerza social que se presentan en el paper que dio origen al modelo (ver sección 2.2.2 y Ref. [29]). El único parámetro que variamos (con el fin de explorar sus efectos) es k_n . El radio y la masa de los peatones se fijó en 0,23 m y 70 Kg, respectivamente. La velocidad de deseo se fijó en $v_d = 1$ m/s para el caso del pasillo y se varió en el rango $1 \text{ m/s} \leq v_d \leq 6 \text{ m/s}$ para el caso del *bottleneck*.

Para las simulaciones en *bottleneck* re-ingresamos a los agentes que salen del recinto de simulación. Es decir, si un agente evacúa por la puerta de salida este es ingresado al recinto de evacuación nuevamente. Lo mismo ocurre con el recinto tipo pasillo. Cuando los individuos llegan al fin del pasillo, se los vuelve a ingresar por el lado opuesto (preservando su velocidad). Cabe destacar que el reingreso de individuos solo fue omitido en el caso del cálculo del tiempo

de evacuación (en el recinto tipo *bottleneck*).

Con respecto a las condiciones iniciales en *bottleneck*, la distribución aleatoria de las velocidades iniciales fue tal que las direcciones tomaban un valor uniforme entre 0 y 2π . El módulo de la velocidad estaba centrado en 1 m/s con una dispersión de 0,4 m/s. Se utilizó una región de 20 m $\times$ 20 m para ubicar las posiciones iniciales de los individuos. Este cuadrado se ubica centrado con respecto a la puerta y a una distancia de 2 m respecto de la puerta.

Las barras de error de los resultados surgieron al calcular la desviación estándar del conjunto de tiempos de evacuación. Cada valor de ese conjunto corresponde a una iteración con condiciones iniciales diferentes.

Las posiciones y velocidades fueron registradas cada 0,05 s. A partir de estos datos pudimos hacer los análisis necesarios. El post procesamiento fue hecho con Python. Usamos librerías como Numpy, Matplotlib, NetworkX. Este último sirvió para analizar a la multitud como una red.

A.2. Simulaciones numéricas del Capítulo 4

En este capítulo hicimos simulaciones numéricas que reproducen el evento empírico analizado (la estampida del Black Friday). El primer objetivo fue poner a prueba distintos conjuntos de parámetros propuestos por diversos autores. El segundo objetivo fue calibrar los parámetros para que las simulaciones se asemejen lo más posible a la situación empírica.

Para recrear las condiciones de la estampida del Black Friday, establecemos un tamaño de puerta de ancho $w = 1,6$ m. Fijamos este valor ya que es casi equivalente al doble del tamaño de una puerta promedio de Sudáfrica [148] (notar que la entrada de la tienda es una puerta de dos hojas). Otro criterio que nos hizo elegir $w = 1,6$ m es que la puerta equivale casi al ancho de hombros de cuatro peatones (aproximadamente 1,6 m); hicimos esta medición aproximada utilizando ImageJ, que es un programa de procesamiento de imágenes de código abierto [149].

El número total de peatones se fijó en $N = 303$. El número N se define como $N = n + m$. Donde $n = 268$ es el número total de peatones que ingresaron a la tienda, mientras que $m = 35$ es el número de peatones que aparecen cerca de la puerta en el último fotograma analizado. Estos m peatones entran en la tienda unos fotogramas después del último fotograma analizado.

Establecemos el diámetro de los agentes simulados siguiendo la Ref. [96]. Se utilizó el ancho de hombros (ancho biacromial) de adultos correspondientes al grupo étnico *non Hispanic black*. En el video [87], es posible observar que hay aproximadamente la misma proporción de hombres y mujeres. Por lo tanto, configuramos la mitad de los agentes simulados como mujeres y la otra mitad como hombres. Para cada mitad, establecemos una distribución gaussiana de anchos de hombros. Para los hombres asignamos $N(41,8 \text{ cm}, 0,1 \text{ cm})$ y para las mujeres asignamos $N(37,7 \text{ cm}, 0,09 \text{ cm})$ [96].

Establecemos una masa de $m = 79,5$ kg a todos los agentes simulados. Este valor es el peso promedio de hombres y mujeres reportado en la Ref. [96]. Probamos si las variaciones en el valor de la masa y el valor del diámetro podrían cambiar los resultados. Encontramos que el modelo es robusto a ligeras variaciones en masa y diámetro.

Las condiciones iniciales son configuraciones de agentes que se sitúan alrededor de la puerta (para reproducir el primer fotograma del video). Para crear estas configuraciones iniciales, los

N agentes se colocaron en un recinto cuadrado con posiciones y velocidades aleatorias. Luego se les hizo pasar a la zona de la puerta pero con la puerta cerrada (para que no salgan del recinto). Después de 20 s los agentes simulados forman un semicírculo alrededor de la puerta. Esa configuración se guarda como condición inicial. Repetimos este proceso 50 veces, variando las posiciones iniciales y las velocidades de los agentes.

En cada proceso de simulación registramos el número de agentes que ingresan a la tienda cada 0,05 s. El proceso de simulación terminó cuando $n = 268$ agentes simulados ingresaron a la tienda (que es el número total de peatones ingresados en las mediciones empíricas). Exploramos el intervalo de velocidades de deseo $2 \text{ m/s} \leq v_d \leq 5 \text{ m/s}$. Este intervalo corresponde a personas ansiosas. Estas velocidades son alcanzables por individuos no atléticos.

Utilizamos diferentes conjuntos de parámetros para realizar simulaciones numéricas. Los conjuntos de parámetros que usamos se muestran en la Tabla 4.1 de la sección 4.1. Cabe destacar que el parámetro k_n en la interacción individuo-pared se dejó fijo en 120000 según la Ref. [29].

Para un dado conjunto de parámetros y una velocidad de deseo dada, realizamos 50 iteraciones variando las condiciones iniciales. Como se mencionó antes, la ecuación de movimiento se integró numéricamente empleando el algoritmo de velocidad de Verlet, con un paso de tiempo $\Delta t = 10^{-4} \text{ s}$.

A.3. Algoritmo evolutivo

Utilizamos el algoritmo evolutivo llamado “evolución diferencial” [97] para hallar el conjunto de parámetros k_n y k_t que mejor aproxima a la curva de evacuación empírica. Los algoritmo evolutivos están inspirados en la evolución biológica y se basan en optimizar las características de una población a partir de prueba y error.

A continuación definimos la terminología propia del algoritmo:

1. Agente: es un candidato de solución. En nuestro caso es un vector de dos componentes (k_n, k_t) . Cuyas componentes son los parámetros a optimizar.
2. Población: es un conjunto de agentes.
3. Probabilidad de entrecruzamiento (CR): es un metaparámetro que indica cuan probable es que dos agentes entrecrucen sus parámetros. $CR \in [0, 1]$
4. Peso diferencial (F): es un metaparámetro que pondera el peso del entrecruzamiento. $F \in [0, 2]$
5. Función de costo/ función objetivo ($f(x)$): es una función que cuantifica cuan bueno es un determinado agente. En nuestro problema esta función está dada por la fórmula 4.1 (del capítulo 4) que compara la curva de evacuación simulada con la curva de evacuación empírica.
6. Costo de corte (ϵ): es el mínimo costo. Si $f(x) < \epsilon$ entonces el proceso termina.

A.3.1. Pasos del algoritmo

1. Inicializa la población de agentes. Crea N conjuntos de parámetros $X = (k_n, k_t)$. Se crean al azar. Cada X es un agente.

2. Loop sobre los agentes. Para cada agente X realiza las siguientes acciones:
 - a) Toma otros tres agentes al azar a , b y c . Estos agentes son distintos entre sí y distintos del agente X .
 - b) Toma un número al azar $r_i \in U(0, 1)$. Siendo i el subíndice asociado a la componente del vector X . En nuestro caso X_1 refiere a k_n y X_2 refiere a k_t .
 - c) Si $r_i < CR$ entonces $Y_i = a_i + F \times (b_i - c_i)$, sino $Y_i = X_i$. Siendo Y el nuevo agente e Y_i el i -ésimo componente del nuevo agente.
 - d) Evaluación: si $f(Y) < f(X)$ entonces reemplaza Y por X en la población de agentes. En caso contrario conserva X .
3. Repite este loop hasta que $f(Y) < \epsilon$ o hasta alcanzar un máximo de iteraciones.

En particular, utilizamos la versión rand/1/bin del algoritmo. Donde “rand” indica que los agentes base se eligen al azar, “1” significa que solo se utiliza una resta vectorial para formar al nuevo agente y el término “bin” (de distribución binomial) indica que se utiliza un entrecruzamiento uniforme durante la formación del agente nuevo.

En esta investigación utilizados los siguientes valores de metaparámetros: $CR = 0,3$ y $F = 0,5$, $\epsilon = 0,1$, máximo de iteraciones = 100. El tamaño de la población de agentes es $N = 20$. Estos parámetros surgen de las recomendaciones de la Ref. [97].

A.4. Simulaciones numéricas del Capítulo 5

En el capítulo 5 hicimos simulaciones numéricas de peatones evacuando una habitación con vestíbulos abiertos de dos o tres entradas. Simulamos una multitud de $N = 200$ agentes cuyas trayectorias seguían una ecuación de movimiento clásica de Newton. Los valores de los parámetros del modelo se eligieron para que fueran los mismos que los parámetros de mejor ajuste informados en el capítulo 4.

La masa de los agentes se fijó en $m = 80$ kg y el radio se fijó en $R = 0,23$ m según los datos de [141]. La velocidad de deseo se varió en el intervalo $0,5 \text{ m/s} \leq v_d \leq 6 \text{ m/s}$. Inicialmente, los agentes se colocaron en un área de $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ con posiciones y velocidades aleatorias. La dirección de la velocidad de deseo era tal que los agentes ubicados fuera del vestíbulo apuntaban primero hacia la entrada más cercana del vestíbulo. Una vez dentro del vestíbulo, el target se convierte en la puerta de salida.

El tamaño de la puerta de salida fue $DS = 1,84 \text{ m}$, lo que equivale al diámetro de cuatro agentes. El tamaño de esta puerta es consistente con la estimación de Ref. [30]. El vestíbulo de dos puertas (Fig. 5.1) consta de un único panel unidimensional de tamaño $L = 4 \times DS = 7,36 \text{ m}$ centrado respecto a la puerta de salida (al igual que en Frank & Dorso [54]).

El vestíbulo de tres entradas (Fig. 5.7) tiene dos paneles del mismo tamaño. Lo llamamos “tres entradas” porque el espacio entre los paneles se convierte en la tercera puerta (además de las entradas izquierda y derecha). El gap se define como el espacio entre paneles. La distancia entre el extremo izquierdo del panel izquierdo y el extremo derecho del panel derecho se fijó en $L = 7,36 \text{ m}$.

Analizamos el efecto de variar cuatro parámetros: la velocidad de deseo v_d , el coeficiente de fricción de la pared k_w , la distancia entre el panel y la puerta d . En el caso del vestíbulo de tres

entradas, variamos el espacio entre paneles (gap). Es importante remarcar que el coeficiente de fricción de la pared es también el coeficiente de fricción del panel ya que, en esta investigación, los paneles son equivalentes a las paredes.

Para cada configuración de parámetros, realizamos 30 procesos de evacuación que finalizaron cuando el 90 % de los agentes abandonaron el recinto. No se permitió el reingreso de agentes. Medimos la densidad media, el flujo de evacuación y la probabilidad de formar *blocking clusters* en las entradas al vestíbulo. La densidad se midió en la región del vestíbulo interior. Se definió como el número de peatones dividido por el área del vestíbulo interior. Registramos la densidad cada 0,5 s desde el inicio de la simulación hasta el final (90 % de individuos evacuados). Posteriormente, se calcularon la media y la desviación estándar a partir de los valores registrados.

A.4.1. Robustez de resultados

En el capítulo 5 solo reportaremos los resultados correspondientes a evacuaciones con $N=200$. Sin embargo, queremos mencionar que hemos realizado simulaciones numéricas con mayor número de agentes $N = 400, 600$ y 1000 (en lugar de $N = 200$) y obtuvimos resultados cualitativamente similares a los que se reportan en dicho capítulo. También probamos la robustez de los resultados reemplazando los paneles unidimensionales con obstáculos de ancho $w = 0,12$ m [54] y no se observaron diferencias significativas.

Medimos la densidad en el vestíbulo interior y la densidad en todo el vestíbulo. En ambos casos, los valores medios son cualitativamente similares. En esta tesis solo reportamos los resultados correspondientes a la densidad del vestíbulo interior porque los datos muestran una menor dispersión alrededor de los valores medios.

A.5. Simulaciones numéricas del Capítulo 6

En el capítulo 6 realizamos simulaciones numéricas de individuos evacuando una habitación en presencia de vestíbulos cerrados de 1 puerta y 2 puertas (ver Fig.6.1 y Fig.6.2, respectivamente). Simulamos multitudes de $N=200$ agentes usando el modelo de Helbing (ver capítulo 2). Utilizamos los valores de los parámetros del modelo obtenidos en el capítulo 4

La masa de los agentes se fijó en $m = 80$ kg y el radio se fijó en $R = 0,23$ m según los datos informados en [141]. La velocidad de deseo (que es el parámetro que controla el nivel de ansiedad) se varió en el intervalo $1 \text{ m/s} \leq v_d \leq 6 \text{ m/s}$. Aunque el límite superior ($v_d = 6 \text{ m/s}$) puede parecer bastante alto, mediciones empíricas recientes en la corrida de toros de San Fermín en Pamplona muestran que individuos (no atletas) pueden alcanzar velocidades $v \sim 6 \text{ m/s}$ [127].

Inicialmente, los agentes comienzan en un área de $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ con posiciones y velocidades aleatorias. La dirección de la velocidad de deseo era tal que los agentes ubicados fuera del vestíbulo apuntaban a la puerta del vestíbulo más cercana. Una vez que están dentro del vestíbulo, el target pasa a ser la puerta de salida.

El tamaño de la puerta de salida es $DS = 1,84$ m, lo que equivale al diámetro de cuatro agentes de acuerdo a [30]. El vestíbulo de 1 puerta (Fig.6.1) se compone de dos obstáculos en forma de panel (es decir, paredes). Las paredes que definen el vestíbulo se extienden hacia los límites de la habitación. La puerta del vestíbulo se coloca simétricamente respecto a la puerta de salida.

El ancho de la puerta del vestíbulo es w .

El diseño del vestíbulo de 2 puertas (Fig.6.2) se compone de tres obstáculos en forma de panel. En este caso, elegimos la siguiente configuración: el panel central tiene la misma longitud que la puerta de salida DS y se coloca justo enfrente. Los paneles izquierdo y derecho son tan largos como la habitación. Ambas puertas del vestíbulo tienen el mismo ancho $w/2$ (por lo tanto, el ancho total de la entrada del vestíbulo es w). El panel central es fijo (en longitud y ubicación), independientemente de w . Esto significa que aumentar w ensancha cada puerta hacia afuera.

En el capítulo 6, analizamos el efecto de variar tres parámetros: la velocidad de deseo v_d , el ancho del vestíbulo d y el ancho total de la puerta del vestíbulo w . Para cada configuración de parámetros, realizamos 30 procesos de evacuación que finalizaron cuando el 90 % de los agentes abandonaron la sala. No se permitió el reingreso de agentes.

Registramos las posiciones y velocidades cada 0,5 s desde el comienzo de la simulación hasta el final (es decir, cuando el 90 % de los individuos salieron de la habitación). Luego, calculamos la densidad media, el flujo de evacuación y la probabilidad de formar *blocking clusters*.

La densidad se midió en la región del vestíbulo interior y se definió como el número de peatones dividido por el área del vestíbulo interior (ver Fig.6.1 y Fig.6.2). El área del vestíbulo interior es $DS \times d$ (donde DS representa el tamaño de la puerta de salida y d es el ancho del vestíbulo). La densidad se calculó cada 0,5 s. Posteriormente, se calcularon el valor medio y la desviación estándar a partir de los valores registrados.

El flujo de evacuación se define de la siguiente manera,

$$J_e = \frac{n}{t_e} \quad (\text{A.1})$$

donde n es el número de peatones evacuados y t_e es el tiempo que tardan esos peatones en evacuar la habitación. La evacuación terminó cuando el 90 % del número inicial de peatones abandonó la sala.

Los *blocking clusters* son el conjunto de individuos que bloquean una puerta (ver capítulo 2 para una definición formal). Medimos la probabilidad de formar *blocking clusters* en tres regiones diferentes: la puerta de salida, las puertas del vestíbulo y también adentro del vestíbulo. La probabilidad se define como la fracción de tiempo que se forman los *blocking clusters* sobre el tiempo total de evacuación.

Al igual que en los otros capítulos de esta tesis, las simulaciones numéricas se llevaron a cabo utilizando LAMMPS [147]. La implementación también requirió módulos personalizados desarrollados en C++. La integración de las trayectorias de los agentes se calculó utilizando el algoritmo de Verlet en velocidades con un paso de tiempo $\Delta t = 10^{-4}$ s

En la Fig. A.1 mostramos un esquema que define las regiones en donde calculamos el *overlap*(t) (de la Fig. 6.10 del capítulo 6). El área roja delimita la región “Cerca de la salida”, mientras que el área azul corresponde a la región “Lejos de la salida”. Ambas regiones son rectángulos cuyo largo va desde la puerta izquierda del vestíbulo hasta la puerta derecha. El ancho es equivalente al tamaño de cuatro individuos.

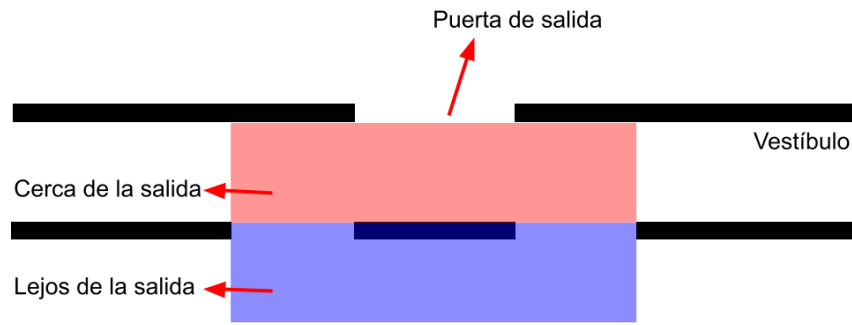


Figura A.1: Esquema que define a las regiones “Cerca de la salida” y “Lejos de la salida”.

A.6. Identificación de *blocking clusters*

A continuación, se presenta el algoritmo para detectar los *blocking clusters* que se forman alrededor de una puerta. En este ejemplo, consideramos que la identificación del *blocking clusters* comienza desde la pared superior hasta la pared inferior (ver Fig. A.2). Es importante destacar que el orden en el que se realiza la identificación del *blocking clusters* es irrelevante; es decir, también se puede iniciar desde la pared inferior hasta la pared superior y el resultado será el mismo.

Pasos para identificar los *blocking clusters*:

1. Identificar al individuo que esté en contacto con la pared superior y cuyo centro de masa esté más cerca de la puerta de salida (Fig. A.2a).
2. Una vez encontrado este primer individuo, seleccionar a un segundo individuo que cumpla con dos condiciones: estar en contacto con el primero y tener su centro de masa más cercano a la puerta de salida (Fig. A.2b).
3. Repetir el paso 2 hasta llegar al individuo que esté en contacto con la pared inferior y que, además, sea el más cercano a la puerta de salida (Fig. A.2d).

El resultado final es un conjunto de individuos que cumplen con la definición de un *cluster* granular y se encuentran en las proximidades de la puerta de salida. En consecuencia, estos individuos interrumpen momentáneamente el flujo de evacuación, lo cual aumenta el tiempo de evacuación. La determinación de los *blocking clusters* se llevó a cabo cada 0,05 s.

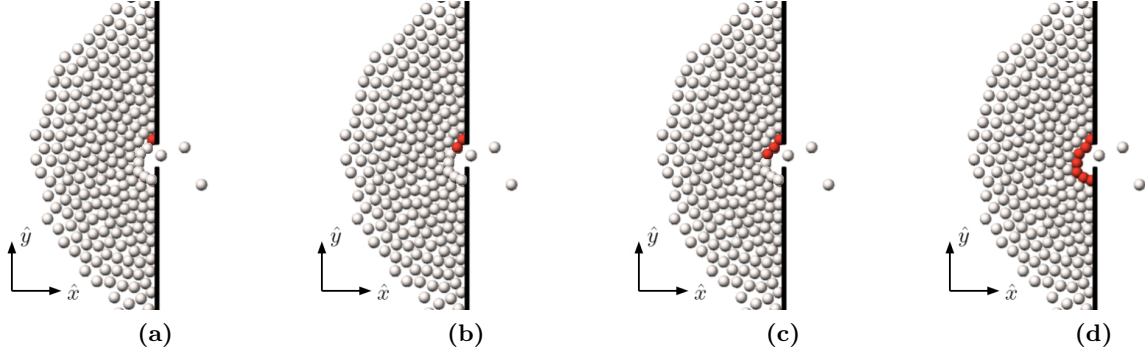


Figura A.2: Representación del paso a paso de la identificación de los *blocking clusters*.

Apéndice B

Re-examinación del rol de la fricción

En este apéndice mostramos resultados que surgen de comparar al modelo con datos empíricos. Los datos empíricos fueron extraídos en la entrada al puente de Jamaraat por Helbing y Johansson [116]. Así como en el capítulo 3 exploramos el coeficiente de rigidez de la fuerza corporal (k_n), en este apéndice mostramos que el valor del coeficiente de fricción (k_t) propuesto por Helbing no es capaz de reproducir el diagrama fundamental empírico. Esto motivó a explorar la fuerza de fricción y concluir que aumentar el valor de k_t permite reproducir comportamientos empíricos.

En el paper [116] los autores realizaron mediciones empíricas del diagrama fundamental. La situación explorada fue la peregrinación masiva hacia la Meca del 12 de Enero del 2006. Las mediciones fueron tomadas a partir de filmaciones que registraron el movimiento de miles de personas a lo largo de una hora en un área de $20 \text{ m} \times 12 \text{ m}$. A partir de estos videos los autores extrajeron las posiciones y velocidades de los peregrinos. Estos datos fueron la base de una serie de análisis. Entre ellos, la medición del diagrama fundamental (flujo vs. densidad).

Hicimos simulaciones numéricas que reproducen la peregrinación masiva con el fin de poner a prueba el modelo de fuerza social [150]. En la Fig. B.1 mostramos el flujo vs. densidad simulado y flujo vs. densidad empírico (en el inset del gráfico).

Lo primero que puede notarse es que las simulaciones no son capaces de reproducir el comportamiento cualitativo del diagrama fundamental empírico. Principalmente, para altos valores de densidad las simulaciones numéricas dan valores crecientes de flujo mientras que en el caso empírico la curva disminuye (por ser este el régimen congestionado).

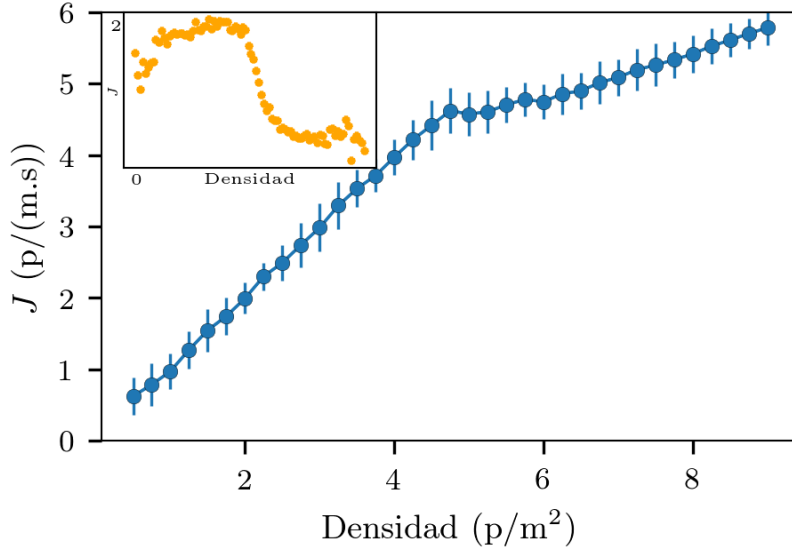


Figura B.1: Flujo en función de la densidad para un recinto tipo pasillo de $20\text{ m} \times 12\text{ m}$. La velocidad de deseo es $v_d = 1\text{ m/s}$ en la dirección longitudinal del pasillo. Una vez que los individuos llegan al final del pasillo se los reingresa. La densidad y el flujo se midieron según la ecuación hidrodinámica presentada en [116]. El inset muestra el diagrama fundamental empírico medido en Ref [116].

Otros autores ya habían advertido esta falencia del modelo de fuerza social y propusieron distintas modificaciones para abordarla. Parisi et al. [36] postulan la incorporación de un “factor de respecto”. Esto implica que si dos individuos están suficientemente cerca, la velocidad de deseo se anula. Kwak et. al. [151] muestran que puede inducirse al régimen congestionado mediante la inclusión de una “atracción” (algo que modifique la trayectoria de los individuos). Johansson propone aumentar el tiempo que tardan los individuos en dar el siguiente paso si la densidad local es suficientemente alta [152].

Todas las modificaciones arriba mencionadas implican cambios en la formulación matemática del modelo, e incluyen hipótesis adicionales respecto del comportamiento de los individuos. Pero, ¿es posible reproducir el comportamiento empírico del diagrama fundamental con solo modificar un parámetro del modelo? Para responder esta pregunta re-examinamos la fuerza de fricción.

En la Fig. B.2 mostramos el gráfico de flujo vs. densidad para tres valores de fricción diferente. La fricción que propone Helbing [29], la fricción aumentada en un factor 5 y la fricción aumentada en un factor 10. La fricción aumentada en un factor 5 logra reproducir el comportamiento cualitativo del diagrama fundamental empírico. La flecha vertical destaca cómo aumentando la fricción se puede obtener el “régimen congestionado” (con un comportamiento semejante a la curva empírica).

Lo importante de este resultado es que es posible reproducir el comportamiento cualitativo del diagrama fundamental empírico con solo hacer una modificación mínima al modelo de fuerza social. Esta modificación consiste en aumentar el valor del coeficiente de fricción.

Todo este análisis nos dio la pauta que es importante tener en cuenta el coeficiente de fricción si se desean calibrar los parámetros del modelo de fuerza social. Por eso, en el capítulo 4 optimizamos tanto al coeficiente de la fuerza corporal (k_n) como al coeficiente de la fuerza de fricción (k_t).

Si bien los datos empíricos mostrados en este apéndice sirvieron para darnos cuenta que la

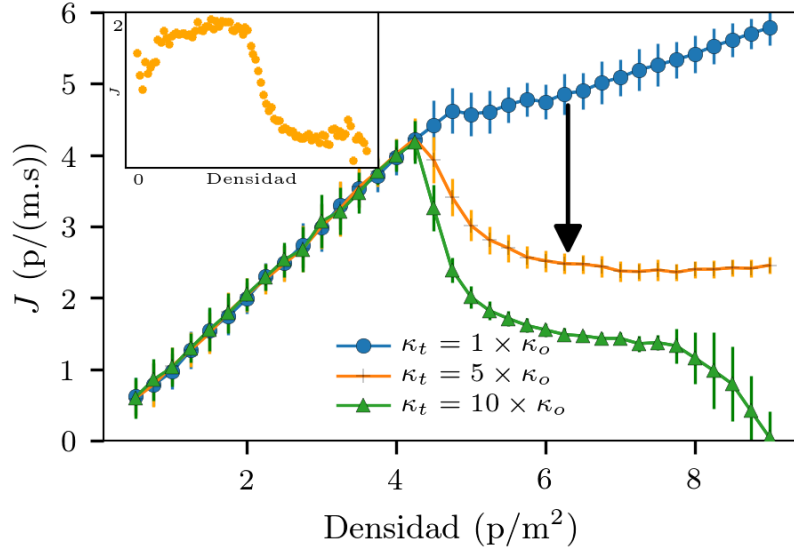


Figura B.2: Flujo en función de la densidad para un recinto tipo pasillo de $20\text{ m} \times 12\text{ m}$. Las mediciones se realizaron con las mismas condiciones que en la Fig. B.1. Se muestran tres valores diferentes de coeficiente de fricción (κ_t), ver la leyenda del gráfico. $\kappa_o = 2,4 \times 10^5$ es el valor propuesto por Helbing en Ref. [29].

fricción propuesta originalmente por Helbing tiene un valor demasiado bajo, es importante tener presente las limitaciones de estos datos. Por un lado, los datos informados en el paper son valores medios procesados (no tuvimos acceso a los datos crudos). Por otro lado, los datos corresponden a un recinto tipo pasillo (y nuestro interés mayor está en los recintos tipo *bottleneck*). Por estos motivos decidimos buscar nuestros propios datos empíricos que nos permitieron hacer una calibración más precisa y confiable del modelo de fuerza social (ver capítulo 4).

Apéndice C

Multitudes más grandes

En este apéndice mostramos resultados para multitudes de tamaño mayor a $N=200$. Exploramos multitudes de $N=600$ y $N=1000$. El resultado más destacable es que el vestíbulo también mejora la evacuación para $N > 200$.

En la Fig. C.1 mostramos el flujo en función de w para diferentes valores de d para una multitud inicial de tamaño $N = 600$. La Fig. C.1a muestra los resultados correspondientes al vestíbulo de 1 puerta y la Fig. C.1b muestra los resultados correspondientes al vestíbulo de 2 puertas. La línea horizontal representa el flujo de evacuación en el escenario “sin vestíbulo” para $N=600$. La característica más notable es que existen ciertos valores de w y d tales que logran un incremento de flujo considerable para una multitud tres veces mayor a la explorada inicialmente (recordar que en el capítulo 6 lidamos con multitudes de $N=200$).

Ambos diseños de vestíbulo parecen mejorar el rendimiento de evacuación (para ciertos valores de d y w). Sin embargo, el vestíbulo de 2 puertas arroja valores de flujo más altos que el vestíbulo de 1 puerta. Además, en el escenario de vestíbulo de 2 puertas, hay un rango más amplio de parámetros estructurales d y w que superan el flujo de la condición sin vestíbulo.

Para multitudes de $N=1000$ existen ciertas condiciones estructurales que mejoran el flujo de evacuación respecto de la situación “sin vestíbulo”. En las siguientes tablas mostramos el flujo para distintas condiciones (variando d , w , v_d y sin vestíbulo). El flujo neto refiere a la resta de flujo con vestíbulo y sin vestíbulo. La tabla C.1 corresponde al vestíbulo cerrado de una puerta, mientras que la tabla C.2 corresponde al vestíbulo cerrado de 2 puertas.

Las filas en color gris destacan aquellas condiciones que producen un flujo neto positivo. Es decir, el vestíbulo produce valores de flujo mayores que la situación sin vestíbulo. Puede verse que el vestíbulo de 2 puertas produce mejores resultados para un rango más amplio de condiciones estructurales (d y w) que el vestíbulo de 1 puerta.

Cabe destacar que, además de $N=1000$, hemos probado evacuaciones con reingreso de individuos (para mantener constante el tamaño de la multitud en el tiempo). En todos los casos explorados hemos encontrado ciertos valores de d y w que mejoran el flujo de evacuación.

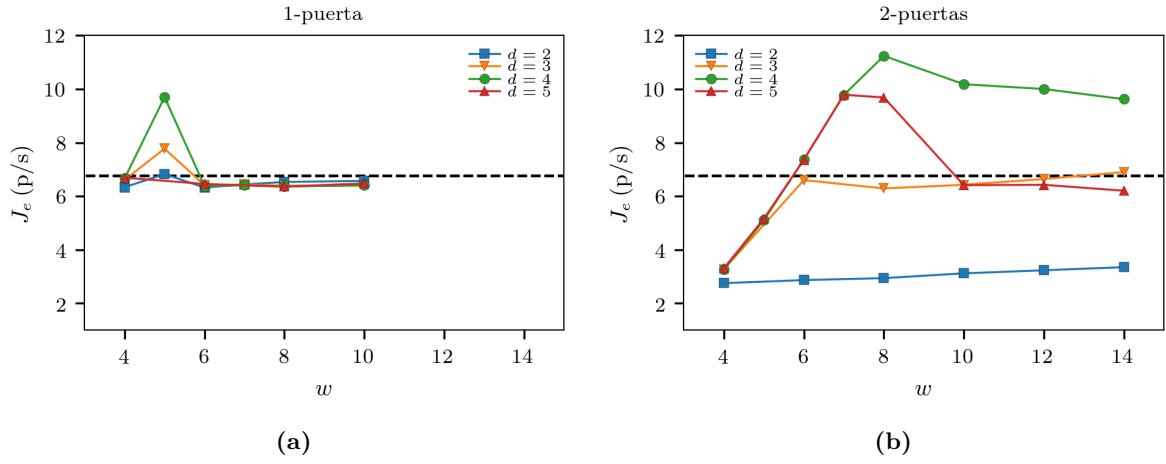


Figura C.1: Flujo de evacuación en función del ancho de la puerta del vestíbulo w . Cada curva corresponde a un ancho de vestíbulo diferente d . La línea horizontal indica el flujo para el escenario “sin vestíbulo”. Los datos se promediaron en 30 procesos de evacuación donde las posiciones y velocidades iniciales fueron aleatorias. El número inicial de peatones es $N=600$. Ver el encabezado de cada gráfico para el tipo de vestíbulo correspondiente.

d	w	v_d (m/s)	J_e (p/s)	J_e (neto)
Sin vestíbulo		3	5,28	-
Sin vestíbulo		6	7,5	-
4	4	3	5,26	-0,02
4	4	6	7,33	-0,17
4	5	3	7,8	2,52
4	5	6	6,81	-0,69
4	6	3	9,75	4,47
4	6	6	6,56	-0,94
4	7	3	5,85	0,57
4	7	6	6,68	-0,82
4	8	3	5,44	0,16
4	8	6	6,82	-0,68
4	10	3	5,27	-0,01
4	10	6	6,98	-0,52
4	12	3	5,28	0
4	12	6	7,02	-0,48
4	14	3	5,21	-0,07
4	14	6	7,02	-0,48

Tabla C.1: Tabla de flujo: sin vestíbulo y vestíbulo de 1 puerta. J_e (neto) refiere al flujo de la situación con vestíbulo menos el flujo de la situación sin vestíbulo. Las filas en color gris denotan las condiciones para las cuales el vestíbulo mejora la evacuación (flujo neto positivo). $N=1000$

d	w	v_d (m/s)	J_e (p/s)	J_e (neto)
Sin vestíbulo		3	5,28	-
Sin vestíbulo		6	7,5	-
4	4	3	2,75	-2,53
4	4	6	3,65	-3,85
4	5	3	4,26	-1,02
4	5	6	5,66	-1,84
4	6	3	6,09	0,81
4	6	6	8,04	0,54
4	7	3	8,08	2,8
4	7	6	9,92	2,42
4	8	3	9,6	4,32
4	8	6	9,95	2,45
4	10	3	9,25	3,97
4	10	6	8,87	1,37
4	12	3	8,82	3,54
4	12	6	7,88	0,38
4	14	3	8,66	3,38
4	14	6	6,66	0,90

Tabla C.2: Tabla de flujo: sin vestíbulo y vestíbulo de 2 puertas. J_e (neto) refiere al flujo de la situación con vestíbulo menos el flujo de la situación sin vestíbulo. Las filas en gris denotan condiciones para las cuales el vestíbulo mejora la evacuación (flujo neto positivo). N=1000

Apéndice D

¿Qué es el pánico?

La palabra pánico proviene del griego *panikos* que significa relativo a Pan. En la mitología griega, Pan era considerado el dios de los campos y bosques. Según esta mitología, Pan provocaba ruidos que hacía que la gente sintiera miedo repentino que los hiciera salir corriendo. Es por eso que el diccionario de la RAE define al pánico como: miedo o terror extremado o muy intenso, que a menudo es colectivo y contagioso [153]. En este apéndice mostramos un recorrido histórico acerca del estudio del pánico.

El estudio del pánico comienza a cobrar importancia a principios de siglo XX. En esta época surgieron muchas investigaciones acerca del pánico que afrontan los soldados en situación de guerra [154]. Muchos de estos estudios se basan en las ideas de Gustave Le Bon acerca de que la gente en grupos está más propensa a tener conductas irracionales [155].

Luego de la segunda guerra mundial el interés por el pánico viró hacia las situaciones de emergencia (en especial incendios y terremotos). Uno de los investigadores pioneros en esta nueva etapa de la investigación del pánico es Enrico Quarantelli [18, 156]. Este psicólogo social definió al pánico como un miedo intenso que hace que las personas quieran escapar del lugar de donde se encuentran lo más rápido posible.

Enrico Quarantelli realizó numerosas investigaciones en las que recopiló evidencia empírica sobre el accionar humano durante hechos catastróficos [157]. Si bien el pánico es un hecho complejo de analizar, gracias a la gran cantidad de evidencia recopilada, fue posible extraer ciertos patrones que caracterizan al pánico [157]:

- El pánico es no-social: los individuos en pánico no tienen una actitud social ni antisocial. La gente busca sobrevivir.
- El pánico es direccionado: la gente huye en una dirección determinada (no escapa en direcciones aleatorias). Normalmente la gente en pánico busca la salida del lugar donde se encuentra.
- El pánico es no-racional: la gente toma decisiones pensando (semi racionalmente) pero en muchas ocasiones no toma las mejores decisiones que podría tomar debido al apuro y la ansiedad que el pánico genera.

Luego surgió la Teoría de la Afiliación propuesta por Anthony Mawson [158]. Esta teoría postula que la gente en estado de pánico no escapa del peligro sino que busca personas o lugares de

“afiliación” o “apego”. Es decir, ante una tragedia, los individuos buscan la seguridad (ya sea buscando a un ser querido o yendo a un lugar de confianza).

A partir de la década del 80 surgió la teoría de Identidad Social propuesta por Stephen Reicher [159]. Esta teoría se opone a las ideas de Le Bon (quien postulaba que los individuos en grupo actúan de forma irracional). Reicher, en cambio, propone que los individuos en grupo forman una “identidad común” que los ayuda a resolver conflictos.

En línea con los trabajos de Reicher, John Drury postula la idea de que en situaciones de emergencia prevalece la solidaridad por encima del egoísmo [160]. Si bien es cierto que en algunas situaciones prevalece la solidaridad a la hora de evacuar, también es cierto que en presencia de una amenaza concreta la gente escapa del lugar donde se encuentra de la forma más rápida posible. Estos son algunos ejemplos de videos donde se ve que la gente entra en pánico como resultado de un hecho peligroso e inesperado [161-164].

Bibliografía

- [1] World Health Organization et al. «Public health for mass gatherings: key considerations». En: (2015).
- [2] Anders Johansson et al. «Crowd and environmental management during mass gatherings». En: *The Lancet infectious diseases* 12.2 (2012), págs. 150-156.
- [3] Rafael González-Val y Miriam Marcén. «Mass gathering events and the spread of infectious diseases: Evidence from the early growth phase of COVID-19». En: *Economics & Human Biology* 46 (2022), pág. 101140.
- [4] Ka Ming Ngai et al. «Human stampedes: a systematic review of historical and peer-reviewed sources». En: *Disaster medicine and public health preparedness* 3.4 (2009), págs. 191-195.
- [5] Maria Rodrigues Leal Moitinho de Almeida et al. «Human stampedes: A scoping review». En: (2016).
- [6] Robert Steffen et al. «Non-communicable health risks during mass gatherings». En: *The Lancet infectious diseases* 12.2 (2012), págs. 142-149.
- [7] Ris S Lee y Roger L Hughes. «Exploring trampling and crushing in a crowd». En: *Journal of transportation engineering* 131.8 (2005), págs. 575-582.
- [8] Ris SC Lee y Roger L Hughes. «Prediction of human crowd pressures». En: *Accident analysis & prevention* 38.4 (2006), págs. 712-722.
- [9] Mark W Kroll et al. «Acute forces required for fatal compression asphyxia: a biomechanical model and historical comparisons». En: *Medicine, Science and the Law* 57.2 (2017), págs. 61-68.
- [10] Ming-Chung Lee et al. «Traumatic asphyxia». En: *The Annals of thoracic surgery* 51.1 (1991), págs. 86-88.
- [11] Meifang Li et al. «The parameter calibration and optimization of social force model for the real-life 2013 Ya'an earthquake evacuation in China». En: *Safety science* 79 (2015), págs. 243-253.
- [12] Enrico Ronchi y Daniel Nilsson. «Fire evacuation in high-rise buildings: a review of human behaviour and modelling research». En: *Fire science reviews* 2.1 (2013), págs. 1-21.
- [13] CW Johnson. «Lessons from the evacuation of the world trade centre, 9/11 2001 for the development of computer-based simulations». En: *Cognition, Technology & Work* 7.4 (2005), págs. 214-240.
- [14] JJ Oh et al. «Mass casualty incident involving pepper spray exposure: impact on the emergency department and management of casualties». En: *Hong Kong Journal of Emergency Medicine* 17.4 (2010), págs. 352-359.

- [15] Dermot Barr, John Drury y Sanjeedah Choudhury. «Understanding collective flight responses to (mis) perceived hostile threats in Britain 2010-2019: a systematic review of ten years of false alarms in crowded spaces». En: *Journal of Risk Research* (2022), págs. 1-19.
- [16] Fernando Ezequiel Cornes, Guillermo A Frank y Claudio Oscar Dorso. «Fear propagation and the evacuation dynamics». En: *Simulation Modelling Practice and Theory* 95 (2019), págs. 112-133.
- [17] Le Monde. *Le rassemblement de la place de la République perturbé par un mouvement de panique* — *lemonde.fr*. https://www.lemonde.fr/attaques-a-paris/article/2015/11/15/mouvements-de-panique-place-de-la-republique-apres-une-alerte-a-la-fusillade_4810479_4809495.html. [Accessed 14-Dec-2022].
- [18] Enrico L Quarantelli. «The nature and conditions of panic». En: *American Journal of Sociology* 60.3 (1954), págs. 267-275.
- [19] Ka Ming Ngai et al. «Comparing two epidemiologic surveillance methods to assess underestimation of human stampedes in India». En: *PLOS Currents Disasters* (2013).
- [20] Clarín.com. *Puerta 12: Memorias del horror* — *clarin.com*. https://www.clarin.com/deportes/puerta-12-memorias-horror_0_HknZUq5g0Yx.html. [Accessed 14-Dec-2022].
- [21] *Relato de una noche de horror a 17 años de la tragedia de Cromañón* — *perfil.com*. <https://www.perfil.com/noticias/actualidad/relato-de-una-noche-de-horror-a-15-anos-de-la-tragedia-de-cromanon.phtml>. [Accessed 14-Dec-2022].
- [22] Donald Theodore Gordon Daniel, Evan Avraham Alpert y Eli Jaffe. «The crowd crush at mount meron: Emergency medical services response to a silent mass casualty incident». En: *Disaster Medicine and Public Health Preparedness* (2022), págs. 1-3.
- [23] <https://www.facebook.com/bbcnews>. *Seoul Halloween crush: Aftermath of disaster in pictures* — *bbc.com*. <https://www.bbc.com/news/world-asia-63444231>. [Accessed 14-Dec-2022].
- [24] URL: <https://documentosboletinoficial.buenosaires.gob.ar/publico/20071207.pdf>.
- [25] URL: <https://www.jesip.org.uk/wp-content/uploads/2022/03/Hillsborough-Stadium-Disaster-final-report.pdf>.
- [26] Stephen Reicher. «The psychology of crowd dynamics». En: *Blackwell handbook of social psychology: Group processes* 1 (2001), págs. 182-208.
- [27] Shigeyuki Okazaki y Satoshi Matsushita. «A study of simulation model for pedestrian movement with evacuation and queuing». En: *International Conference on Engineering for Crowd Safety*. Vol. 271. 1993.
- [28] GS Zhi, SM Lo y Z Fang. «A graph-based algorithm for extracting units and loops from architectural floor plans for a building evacuation model». En: *Computer-Aided Design* 35.1 (2003), págs. 1-14.
- [29] Dirk Helbing, Illés Farkas y Tamas Vicsek. «Simulating dynamical features of escape panic». En: *Nature* 407.6803 (2000), págs. 487-490.
- [30] Ignacio Mariano Sticco, Guillermo Alberto Frank y Claudio Oscar Dorso. «Social force model parameter testing and optimization using a high stress real-life situation». En: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 561 (2021), pág. 125299.
- [31] Leroy F Henderson. «On the fluid mechanics of human crowd motion». En: *Transportation research* 8.6 (1974), págs. 509-515.

- [32] Andreas Schadschneider et al. «Fundamentals of pedestrian and evacuation dynamics». En: *Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering*. IGI Global, 2009, págs. 124-154.
- [33] Minoru Fukui y Yoshihiro Ishibashi. «Self-organized phase transitions in cellular automaton models for pedestrians». En: *Journal of the physical society of Japan* 68.8 (1999), págs. 2861-2863.
- [34] Victor J Blue y Jeffrey L Adler. «Cellular automata microsimulation of bidirectional pedestrian flows». En: *Transportation Research Record* 1678.1 (1999), págs. 135-141.
- [35] Dirk Helbing y Peter Molnar. «Social force model for pedestrian dynamics». En: *Physical review E* 51.5 (1995), pág. 4282.
- [36] Daniel R Parisi, Marcelo Gilman y Herman Moldovan. «A modification of the social force model can reproduce experimental data of pedestrian flows in normal conditions». En: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 388.17 (2009), págs. 3600-3608.
- [37] Taras I Lakoba, David J Kaup y Neal M Finkelstein. «Modifications of the Helbing-Molnar-Farkas-Vicsek social force model for pedestrian evolution». En: *Simulation* 81.5 (2005), págs. 339-352.
- [38] Anders Johansson, Dirk Helbing y Pradyumn K Shukla. «Specification of the social force pedestrian model by evolutionary adjustment to video tracking data». En: *Advances in complex systems* 10.supp02 (2007), págs. 271-288.
- [39] G Amontons. «De la resistance cause'e dans les machines (About resistance and force in machines)». En: *Mem. l'Acedemie R* (), págs. 257-282.
- [40] Charles Augustin Coulomb. «Essai sur une application des regles de maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs a l'architecture». En: *Mem. Div. Sav. Acad.* (1773).
- [41] James M Haile. *Molecular dynamics simulation: elementary methods*. John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- [42] Jun Zhang et al. «Ordering in bidirectional pedestrian flows and its influence on the fundamental diagram». En: *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* 2012.02 (2012), P02002.
- [43] Tobias Kretz et al. «Experimental study of pedestrian counterflow in a corridor». En: *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* 2006.10 (2006), P10001.
- [44] Dirk Helbing, Anders Johansson y Habib Z Al-Abideen. «Crowd turbulence: the physics of crowd disasters». En: *arXiv preprint arXiv:0708.3339* (2007).
- [45] Dirk Helbing, Illés J Farkas y Tamás Vicsek. «Freezing by heating in a driven mesoscopic system». En: *Physical review letters* 84.6 (2000), pág. 1240.
- [46] A Garcimartín et al. «Experimental evidence of the “Faster Is Slower” effect». En: *Transportation Research Procedia* 2 (2014), págs. 760-767.
- [47] Daniel Ricardo Parisi y Claudio Oscar Dorso. «Microscopic dynamics of pedestrian evacuation». En: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 354 (2005).
- [48] A Strachan y CO Dorso. «Fragment recognition in molecular dynamics». En: *Physical Review C* 56.2 (1997), pág. 995.
- [49] *Toma del Ministerio de Desarrollo Social — youtube.com. <https://youtube.com/shorts/m8bRTusRmFY?feature=share>. [Accessed 17-Mar-2023]*.
- [50] Iker Zuriguel et al. «Clogging transition of many-particle systems flowing through bottle-necks». En: *Scientific reports* 4.1 (2014), págs. 1-8.

- [51] Dirk Helbing et al. «Self-organized pedestrian crowd dynamics: Experiments, simulations, and design solutions». En: *Transportation science* 39.1 (2005), págs. 1-24.
- [52] Xiaomeng Shi et al. «Examining effect of architectural adjustment on pedestrian crowd flow at bottleneck». En: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 522 (2019), págs. 350-364.
- [53] Yongxiang Zhao et al. «Experimental verification of escape efficiency enhancement by the presence of obstacles». En: *Safety science* 122 (2020), pág. 104517.
- [54] Guillermo Alberto Frank y Claudio Oscar Dorso. «Room evacuation in the presence of an obstacle». En: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 390.11 (2011), págs. 2135-2145.
- [55] Rodrigo Escobar y Armando De La Rosa. «Architectural design for the survival optimization of panicking fleeing victims». En: *European Conference on Artificial Life*. Springer. 2003, págs. 97-106.
- [56] Yongxiang Zhao et al. «Optimal layout design of obstacles for panic evacuation using differential evolution». En: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 465 (2017), págs. 175-194.
- [57] Iker Zuriguel et al. «Contact forces and dynamics of pedestrians evacuating a room: The column effect». En: *Safety science* 121 (2020), págs. 394-402.
- [58] Andreas Neurauter et al. «Comparison of mechanical characteristics of the human and porcine chest during cardiopulmonary resuscitation». En: *Resuscitation* 80.4 (2009), págs. 463-469.
- [59] AE Tomlinson et al. «Compression force–depth relationship during out-of-hospital cardiopulmonary resuscitation». En: *Resuscitation* 72.3 (2007), págs. 364-370.
- [60] John M Cavanaugh. «The biomechanics of thoracic trauma». En: *Accidental Injury*. Springer, 1993, págs. 362-390.
- [61] JOSHUA E Tsitlik et al. «Elastic properties of the human chest during cardiopulmonary resuscitation.» En: *Critical Care Medicine* 11.9 (1983), págs. 685-692.
- [62] Myron L Weisfeldt. *Compliance Characteristics of the Human Chest During Cardiopulmonary Resuscitation. Final Report*. US National Highway Traffic Safety Administration, 1979.
- [63] RL Stalnaker et al. «Human torso response to blunt trauma». En: *Human Impact Response*. Springer, 1973, págs. 181-199.
- [64] John W Melvin. *AATD system technical characteristics, design concepts, and trauma assessment criteria. Task EF final report*. Inf. téc. 1988.
- [65] Roberto Arévalo et al. «Contact network topology in tapped granular media». En: *Physical Review E* 87.2 (2013), pág. 022203.
- [66] XL Zhang et al. «Empirical study of a unidirectional dense crowd during a real mass event». En: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 392.12 (2013).
- [67] Ulrich Weidmann. «Transporttechnik der Fussgänger, volume 90 of Schriftenreihe des IVT». En: *Institute for Transport Planning and Systems ETH Zürich* 2 (1992), págs. 10-47.
- [68] Vi Ha y George Lykotrafitis. «Agent-based modeling of a multi-room multi-floor building emergency evacuation». En: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 391.8 (2012), págs. 2740-2751.
- [69] Xiao Song et al. «Characteristic time based social force model improvement and exit assignment strategy for pedestrian evacuation». En: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 505 (2018), págs. 530-548.

- [70] Priscila Saboia y Siome Goldenstein. «Crowd simulation: applying mobile grids to the social force model». En: *The Visual Computer* 28.10 (2012), págs. 1039-1048.
- [71] Xiaoxia Yang et al. «Guided crowd dynamics via modified social force model». En: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 411 (2014), págs. 63-73.
- [72] Limao Zhang et al. «Simulation-based route planning for pedestrian evacuation in metro stations: A case study». En: *Automation in Construction* 71 (2016), págs. 430-442.
- [73] — *youtube.com*. <https://www.youtube.com/watch?v=QH6oPhdfUzg>. [Accessed 17-Mar-2023].
- [74] Milad Haghani y Majid Sarvi. «Simulating pedestrian flow through narrow exits». En: *Physics Letters A* 383.2-3 (2019), págs. 110-120.
- [75] Hye Rin Lindsay Lee et al. «Speed modulated social influence in evacuating pedestrian crowds». En: *Collective Dynamics* 5 (2020), págs. 1-24.
- [76] Ming Tang y Hongfei Jia. «An approach for calibration and validation of the social force pedestrian model». En: *Proceedings 2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE)*. IEEE. 2011, págs. 2026-2031.
- [77] Serge P Hoogendoorn y Winnie Daamen. «Microscopic calibration and validation of pedestrian models: Cross-comparison of models using experimental data». En: *Traffic and Granular Flow'05*. Springer, 2007, págs. 329-340.
- [78] Stefan Seer et al. «Validating social force based models with comprehensive real world motion data». En: *Transportation Research Procedia* 2 (2014), págs. 724-732.
- [79] Albert Steiner, Michel Philipp y Alex Schmid. «Parameter estimation for a pedestrian simulation model». En: *Swiss Transport Research Conference, Ascona, 12-14 September 2007*. 2007.
- [80] SMP Siddharth y P Vedagiri. «Modeling the gender effects of pedestrians and calibration of the modified social force model». En: *Transportation research record* 2672.31 (2018), págs. 1-9.
- [81] Weiliang Zeng et al. «Specification and calibration of a microscopic model for pedestrian dynamic simulation at signalized intersections: A hybrid approach». En: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 80 (2017), págs. 37-70.
- [82] Matthias Luber et al. «People tracking with human motion predictions from social forces». En: *2010 IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE. 2010, págs. 464-469.
- [83] Alessandro Corbetta, Adrian Muntean y Kiamars Vafayi. «Parameter estimation of social forces in pedestrian dynamics models via a probabilistic method». En: *Mathematical biosciences and engineering* 12.2 (2015), págs. 337-356.
- [84] Tobias Kretz. «On oscillations in the social force model». En: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 438 (2015), págs. 272-285.
- [85] Nikolai Bode. «Parameter calibration in crowd simulation models using approximate Bayesian computation». En: *arXiv preprint arXiv:2001.10330* (2020).
- [86] Jack Liddle et al. «An experimental study of pedestrian congestions: influence of bottleneck width and length». En: *arXiv preprint arXiv:0911.4350* (2009).
- [87] *Black Friday in South Africa, stampede Nike store East Rand Mall* — *youtube.com*. <https://www.youtube.com/watch?v=XTPom0yyxi4>. [Accessed 17-Mar-2023].
- [88] Daniel Ricardo Parisi y Claudio Oscar Dorso. «Morphological and dynamical aspects of the room evacuation process». En: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 385.1 (2007), págs. 343-355.

- [89] Alexandre Nicolas, Sebastián Bouzat y Marcelo N Kuperman. «Pedestrian flows through a narrow doorway: Effect of individual behaviours on the global flow and microscopic dynamics». En: *Transportation Research Part B: Methodological* 99 (2017), págs. 30-43.
- [90] A Seyfried et al. «Capacity estimation for emergency exits and bottlenecks». En: *Interflam 2007* (2007), págs. 247-258.
- [91] Angel Garcimartín et al. «Flow of pedestrians through narrow doors with different competitiveness». En: *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* 2016.4 (2016), págs. 043402.
- [92] Wang Jianyu et al. «Experimental study of architectural adjustments on pedestrian flow features at bottlenecks». En: *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* 2019.8 (2019), págs. 083402.
- [93] Ryoichi Nagai, Masahiro Fukamachi y Takashi Nagatani. «Evacuation of crawlers and walkers from corridor through an exit». En: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 367 (2006), págs. 449-460.
- [94] Armin Seyfried et al. «New insights into pedestrian flow through bottlenecks». En: *Transportation Science* 43.3 (2009), págs. 395-406.
- [95] Ignacio Mariano Sticco, Guillermo Alberto Frank y Claudio Oscar Dorso. «Effects of the body force on the pedestrian and the evacuation dynamics». En: *Safety science* 129 (2020), págs. 104829.
- [96] Margaret A McDowell, Cheryl D Fryar y Cynthia L Ogden. «Anthropometric reference data for children and adults: United States, 1988-1994.» En: *Vital and health statistics. Series 11, Data from the national health survey* 249 (2009), págs. 1-68.
- [97] Rainer Storn. «On the usage of differential evolution for function optimization». En: *Proceedings of north american fuzzy information processing*. Ieee. 1996, págs. 519-523.
- [98] John M Cavanaugh y Narayan Yoganandan. «Thorax injury biomechanics». En: *Accidental Injury*. Springer, 2015, págs. 331-372.
- [99] Alan M Nahum y John W Melvin. *Accidental injury: biomechanics and prevention*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [100] Cyril M Harris. *Dictionary of Architecture and Construction*. McGraw-Hill, 2006.
- [101] Ángel Garcimartín et al. «Redefining the role of obstacles in pedestrian evacuation». En: *New Journal of Physics* 20.12 (2018), págs. 123025.
- [102] Yiwen Liu et al. «Controlled experiments to examine different exit designs on crowd evacuation dynamics». En: *CICTP 2016*. 2016, págs. 779-790.
- [103] Nirajan Shiwakoti y Majid Sarvi. «Enhancing the panic escape of crowd through architectural design». En: *Transportation research part C: emerging technologies* 37 (2013), págs. 260-267.
- [104] Qiaoru Li et al. «Emergency evacuation with incomplete information in the presence of obstacles». En: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 533 (2019), págs. 122068.
- [105] Yongxiang Zhao et al. «The self-slowng behavioral mechanism of pedestrians under normal and emergency conditions». En: *Physics Letters A* 381.37 (2017), págs. 3149-3160.
- [106] Zhongjun Ding et al. «Evacuation through area with obstacle that can be stepped over: experimental study». En: *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* 2020.2 (2020), págs. 023404.

- [107] Ansgar Kirchner, Katsuhiro Nishinari y Andreas Schadschneider. «Friction effects and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics». En: *Physical review E* 67.5 (2003), pág. 056122.
- [108] Daichi Yanagisawa et al. «Study on efficiency of evacuation with an obstacle on hexagonal cell space». En: *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration* 3.6 (2010), págs. 395-401.
- [109] Takashi Matsuoka et al. «Effects of an obstacle position for pedestrian evacuation: SF model approach». En: *Traffic and Granular Flow'13*. Springer, 2015, págs. 163-170.
- [110] Nirajan Shiwakoti, Xiaomeng Shi y Zhirui Ye. «A review on the performance of an obstacle near an exit on pedestrian crowd evacuation». En: *Safety science* 113 (2019), págs. 54-67.
- [111] A Garcimartín et al. «Flow and clogging of a sheep herd passing through a bottleneck». En: *Physical Review E* 91.2 (2015), pág. 022808.
- [112] Iker Zuriguel et al. «Effect of obstacle position in the flow of sheep through a narrow door». En: *Physical Review E* 94.3 (2016), pág. 032302.
- [113] Armin Seyfried et al. «The fundamental diagram of pedestrian movement revisited». En: *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* 2005.10 (2005), P10002.
- [114] Xiangxia Ren, Jun Zhang y Weiguo Song. «Flows of walking and running pedestrians in a corridor through exits of different widths». En: *Safety Science* 133 (2021), pág. 105040.
- [115] Shuchao Cao et al. «Fundamental diagrams for multidirectional pedestrian flows». En: *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* 2017.3 (2017), pág. 033404.
- [116] Dirk Helbing, Anders Johansson y Habib Zein Al-Abideen. «Dynamics of crowd disasters: An empirical study». En: *Physical review E* 75.4 (2007), pág. 046109.
- [117] Rainald Lohner et al. «Fundamental diagrams for specific very high density crowds». En: *Collective Dynamics* 2 (2018), págs. 1-15.
- [118] Tobias Kretz. «An overview of fundamental diagrams of pedestrian dynamics». En: (2019).
- [119] Shuchao Cao et al. «Investigation of difference of fundamental diagrams in pedestrian flow». En: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 506 (2018), págs. 661-670.
- [120] Seer S. Matyus T. Schrom-Feiertag H. «Modelling Pedestrian Overlap from Dense Crowd Observations». En: *Proceedings of Pedestrian and Evacuation Dynamics 2016, Collective Dynamics* (2016), págs. 359-363.
- [121] Gabriele Bernardini, Enrico Quagliarini y Marco D'Orazio. «Towards creating a combined database for earthquake pedestrians' evacuation models». En: *Safety science* 82 (2016), págs. 77-94.
- [122] Winnie Daamen, Serge P Hoogendoorn y Piet HL Bovy. «First-order pedestrian traffic flow theory». En: *Transportation research record* 1934.1 (2005), págs. 43-52.
- [123] Marek Bukáček, Pavel Hrabák y Milan Krbálek. «Experimental analysis of two-dimensional pedestrian flow in front of the bottleneck». En: *Traffic and Granular Flow'13*. Springer, 2015, págs. 93-101.
- [124] Armin Seyfried et al. «Enhanced empirical data for the fundamental diagram and the flow through bottlenecks». En: *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*. Springer, 2010, págs. 145-156.
- [125] Claudio Feliciani et al. «Systematic experimental investigation of the obstacle effect during non-competitive and extremely competitive evacuations». En: *Scientific reports* 10.1 (2020), págs. 1-20.

- [126] Brandon Haworth et al. «On density–flow relationships during crowd evacuation». En: *Computer Animation and Virtual Worlds* 28.3-4 (2017), e1783.
- [127] Daniel R Parisi et al. «Pedestrian dynamics at the running of the bulls evidence an inaccessible region in the fundamental diagram». En: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118.50 (2021), e2107827118.
- [128] I Echeverría-Huarte, I Zuriguel y RC Hidalgo. «Pedestrian evacuation simulation in the presence of an obstacle using self-propelled spherocylinders». En: *Physical Review E* 102.1 (2020), pág. 012907.
- [129] Serge P Hoogendoorn y Winnie Daamen. «Pedestrian behavior at bottlenecks». En: *Transportation science* 39.2 (2005), págs. 147-159.
- [130] A Garcimartín et al. «Pedestrian collective motion in competitive room evacuation». En: *Scientific reports* 7.1 (2017), págs. 1-9.
- [131] Liang Li, Hong Liu y Yanbin Han. «Arch formation-based congestion alleviation for crowd evacuation». En: *Transportation research part C: emerging technologies* 100 (2019), págs. 88-106.
- [132] Libi Fu et al. «The influence of emergency signage on building evacuation behavior: An experimental study». En: *Fire and materials* 43.1 (2019), págs. 22-33.
- [133] Milad Haghani. «Optimising crowd evacuations: Mathematical, architectural and behavioural approaches». En: *Safety science* 128 (2020), pág. 104745.
- [134] Ahmed Abdelghany et al. «Modeling framework for optimal evacuation of large-scale crowded pedestrian facilities». En: *European Journal of Operational Research* 237.3 (2014), págs. 1105-1118.
- [135] Salvador Casadesús Pursals y Federico Garriga Garzón. «Optimal building evacuation time considering evacuation routes». En: *European Journal of Operational Research* 192.2 (2009), págs. 692-699.
- [136] Xiao Song et al. «Selfishness-and selflessness-based models of pedestrian room evacuation». En: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 447 (2016), págs. 455-466.
- [137] Yuan Cheng y Xiaoping Zheng. «Emergence of cooperation during an emergency evacuation». En: *Applied Mathematics and Computation* 320 (2018), págs. 485-494.
- [138] IM Sticco, GA Frank y CO Dorso. «Improving competitive evacuations with a vestibule structure designed from panel-like obstacles in the framework of the Social Force Model». En: *Safety science* 146 (2022), pág. 105544.
- [139] Fernando Ezequiel Cornes, Guillermo Alberto Frank y Claudio Oscar Dorso. «High pressures in room evacuation processes and a first approach to the dynamics around unconscious pedestrians». En: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 484 (2017), págs. 282-298.
- [140] Chongyang Wang y Wenguo Weng. «Study on the collision dynamics and the transmission pattern between pedestrians along the queue». En: *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* 2018.7 (2018), pág. 073406.
- [141] David Littlefield. *Metric handbook*. Routledge, 2008.
- [142] FE Cornes, GA Frank y CO Dorso. «Microscopic dynamics of the evacuation phenomena in the context of the Social Force Model». En: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 568 (2021), pág. 125744.
- [143] *Evacuación con y sin vestíbulo* — *youtube.com*. <https://www.youtube.com/watch?v=DX1xvuVG3PM>. [Accessed 17-Mar-2023].

- [144] Ignacio Mariano Sticco et al. «Room evacuation through two contiguous exits». En: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 474 (2017), págs. 172-185.
- [145] LA Fullard et al. «The dynamics of granular flow from a silo with two symmetric openings». En: *Proceedings of the Royal Society A* 475.2221 (2019), pág. 20180462.
- [146] EJ Evans y F Hayden. «Tests on Live Subjects to Determine the Tolerable Forces That May Be Exerted by Crowd Control Crush Barriers». En: *Report on Research in Biomechanics at the University of Surrey* (1971).
- [147] Steve Plimpton. «Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics». En: *Journal of computational physics* 117.1 (1995), págs. 1-19.
- [148] *What are the Standard Door Sizes in your Country? — Doors Direct — doorsdirect.co.za.* <https://www.doorsdirect.co.za/what-are-the-standard-door-sizes-in-your-country>. [Accessed 23-Dec-2022].
- [149] *ImageJ — imagej.nih.gov.* <https://imagej.nih.gov/ij/>. [Accessed 23-Dec-2022].
- [150] Ignacio Mariano Sticco et al. «A re-examination of the role of friction in the original Social Force Model». En: *Safety science* 121 (2020), págs. 42-53.
- [151] Jaeyoung Kwak et al. «Jamming transitions induced by an attraction in pedestrian flow». En: *Physical Review E* 96.2 (2017), pág. 022319.
- [152] Anders Johansson. «Constant-net-time headway as a key mechanism behind pedestrian flow dynamics». En: *Physical review E* 80.2 (2009), pág. 026120.
- [153] URL: <https://dle.rae.es/p%C3%A1nico>.
- [154] Anselm L Strauss. «The literature on panic.» En: *The Journal of Abnormal and Social Psychology* 39.3 (1944), pág. 317.
- [155] Gustave Le Bon. *The crowd: A study of the popular mind*. Courier Corporation, 2002.
- [156] Enrico L Quarantelli y Russell R Dynes. «Response to social crisis and disaster». En: *Annual review of sociology* (1977), págs. 23-49.
- [157] Enrico L Quarantelli. «Panic Behavior: some empirical observations». En: (1975).
- [158] Anthony R Mawson. *Mass panic and social attachment: The dynamics of human behavior*. Routledge, 2017.
- [159] John C Turner et al. *Rediscovering the social group: A self-categorization theory*. basil Blackwell, 1987.
- [160] John Drury, Chris Cocking y Steve Reicher. «Everyone for themselves? A comparative study of crowd solidarity among emergency survivors». En: *British Journal of Social Psychology* 48.3 (2009), págs. 487-506.
- [161] *Panic leads to stampede at New York's Penn Station during rush hour — youtube.com.* <https://www.youtube.com/watch?v=1Tetcf2NpSg>. [Accessed 17-Mar-2023].
- [162] *Police release video of mad scramble after gunshot fired — youtube.com.* <https://www.youtube.com/watch?v=TpuztBy-veg>. [Accessed 17-Mar-2023].
- [163] *September 11 World Trade Center Attack — youtube.com.* <https://www.youtube.com/watch?v=5bibWyUUjqU>. [Accessed 17-Mar-2023].
- [164] *Italy bomb scare sparks massive stampede, leaving 1,500 injured - VIDEO — youtube.com.* <https://www.youtube.com/watch?v=DL93Vy1mhgw>.