

Evacuaciones de Emergencia Considerando el Comportamiento Humano en Pánico

Francisco Javier Gañán Onieva
Francisco Jiménez García
Isidro Matos Bellido
Álvaro Molina Espejo
Juan Antonio Sánchez Díaz

1. Introducción

El 2 de noviembre de 2022 se cumplirá el décimo aniversario de la tragedia del Madrid Arena. En este hecho, provocado por una avalancha en el recinto deportivo dependiente de la Comunidad de Madrid, se tuvieron que lamentar cinco víctimas mortales y numerosos heridos. Es por ello que, para cualquier empresa, institución o incluso comunidad de vecinos, es importante tener un plan de evacuación para que en caso de emergencia o alarma las personas desalojen el recinto en el menor tiempo posible, de forma ordenada y sin sufrir daños.

Lo anterior afecta a todo tipo de edificios como oficinas, instituciones públicas, pabellones, estadios de fútbol o bloques de vecinos. De hecho, en el artículo 20 de la Ley de Prevención de Riesgos laborales, se obliga a las empresas a disponer de dicho plan de evacuación.

Por tanto, se considera de gran utilidad poder comprobar como se comportarían las personas al evacuar un determinado recinto, ante diferentes estrategias predefinidas de evacuación. Los simulacros de emergencia, sin embargo, conllevan tiempo y suponen un coste a veces demasiado elevado. Además, las conclusiones extraídas de estos simulacros pueden estar alejadas de la realidad, ya que factores como el pánico pueden no tener suficiente influencia.

En este modelo multiagente se simula el comportamiento de las personas bajo los efectos del pánico en evacuaciones de emergencia. En él se analizan resultados como el número de personas heridas, dónde se producen los atascos, el tiempo que tardan las personas en salir, etc.

El software utilizado es *NetLogo*, en el que se simulan, por un lado, los obstáculos, paredes y puertas. Por otro lado, cada persona es definida como un agente, cuyo comportamiento se modela mediante fuerzas sociales y físicas que tienen en cuenta la interacción entre personas y entre estas y el entorno. En este modelo se han contemplado algunos escenarios con diferentes configuraciones y número de personas, para evaluar su validez y comparar entre diferentes estrategias de evacuación.

2. Descripción del modelo

El propósito de este modelo es crear un entorno de simulación para evaluar el comportamiento de personas en evacuaciones, considerando el pánico. Para ello, se configuran varios escenarios predeterminados. Además, se le ofrece la posibilidad al usuario de diseñar escenarios personalizados. El objetivo es analizar las diferentes estrategias de evacuación posibles, como el número de puertas de emergencia, su visibilidad, determinar el aforo máximo de la sala, ... Todo lo

anterior es de vital importancia en situaciones de emergencia, ya que factores como el tiempo de evacuación, el nivel de pánico o las fuerzas que sufren son críticas para la seguridad e incluso la vida de las personas.

Para el desarrollo del modelo de comportamiento basado en el pánico se cuenta con [TR18] y con [HFV00], que es usado como apoyo al anterior. Para el desarrollo del modelo de fuerzas sociales se utiliza [HM95].

2.1. Entidades, variables de estado y escalas

Solo tenemos un tipo de agente móvil, las personas. Cada persona tiene una serie de atributos que la determinan completamente:

- r [m], el radio de una persona, la mitad del ancho de sus hombros. Lo tomamos como un valor entre 0.25-0.4m. Este parámetro no varía con el tiempo.
- w [kg], el peso de una persona. Será un valor entre 40-80kg, que no varía a lo largo de la ejecución.
- v [m/s], el vector que determina la velocidad en cada instante. Como valor inicial se tomará con módulo 0. Durante la simulación, no podrá superar el valor del parámetro v_max (configurable por el usuario). v_max se ha establecido a 1.95 m/s, pues en situaciones reales con alta densidad de personas la velocidad que alcanzan no suele ser superior a este valor.
- v_nueva [m/s], es la velocidad deseada del agente en cada instante. Se actualiza cada segundo. Su valor se determina a partir de: v_goal , un término de alineación de velocidades y un término de agrupación.
- $v_max_desired$ [m/s], módulo máximo de la velocidad deseada (v_nueva) que puede alcanzar cada persona. En ella influyen factores como el número de personas que se encuentran en su rango de visión o el pánico de la persona.
- v_goal [m/s], vector que determina la velocidad correspondiente a ir hacia la puerta. Este término influye en la velocidad deseada.
- $panic$, el nivel de pánico. Cuando su valor es 0 significa que la persona está tranquila, suponiendo que valores cercanos a 1 implicarán altos niveles de pánico.
- l [m], distancia a la puerta que una persona considera como segura. Estar a una distancia mayor hace que aumente su pánico. Se toma como $10*r$.
- d_c [m], distancia radial desde cada agente, que define los límites del grupo que se considera para el comportamiento de cohesión. Se toma como $8*r$.
- d_l [m], distancia radial desde cada agente, que define los límites del grupo que se considera para el comportamiento de alineamiento. Se escoge como $4*r$.
- m_g , parámetro que pondera la velocidad asociada a alcanzar el objetivo. Es dominante cuando la persona conoce el objetivo y no interviene en caso contrario. Se establece en 6.5.
- m_c , parámetro que pondera la velocidad asociada al comportamiento del agente “siguiendo al rebaño”. Este es dominante cuando el conocimiento del agente sobre el entorno es limitado. Se toma como 1.5.

- **m_1**, parámetro que pondera la velocidad asociada al comportamiento de alineación del agente. Se puede incrementar cuando se necesita coordinación entre agentes como en las colas que se forman en zonas estrechas. Se elige como 1.5.
- **puerta_vista**, parámetro que toma el valor 1 si la persona ve una salida, y 0 en caso contrario.
- **modulo_fuerza_total** $[N/m]$, fuerza que actúa sobre una persona debido a su entorno.
- **aceleracion** $[m/s^2]$, aceleración total producida en cada persona. Es la suma de la aceleración que hace el agente para mantener su velocidad deseada y la aceleración que recibe del resto de agentes (**aceleracion_recibe**).
- **aceleracion_recibe** $[m/s^2]$, aceleración recibida por el resto de agentes.

También existen dos tipos más de agentes fijos: los agentes puerta, que representan una salida; y los agentes obstáculo. Estos tipos de agente conforman, junto con el suelo (*patches*), el escenario. Se diferencian visualmente de este último por su color rojo y azul, respectivamente.

Además, consideramos los siguientes parámetros globales:

- **T** $[N/m]$, umbral de disconformidad. Si una persona recibe una fuerza que, dividida por la longitud de su circunferencia (considerando personas como círculos en dos dimensiones), es mayor que T, quedará inmóvil y se convertirá en un obstáculo para el resto.
- **tau**, factor de relajación que afecta a las fuerzas sociales.
- **A** y **B**, constantes que influyen en la fuerza social de separación entre agentes.
- **k1** y **k2**, coeficientes relacionados con las fuerzas físicas entre las personas. **k1** representa la constante de fuerza entre cuerpos y **k2** la constante de fricción por deslizamiento.

2.2. Resumen del proceso y su planificación

Las únicas entidades que varían su estado durante la ejecución del modelo son las personas. Este estado varía con respecto al tiempo. Para modelarlo, se ha discretizado en intervalos de una décima de segundo.

La función **evacuate** se ejecuta cada décima de segundo (a una frecuencia teórica de 10 Hz), actualizando la velocidad, aceleración, posición y fuerza recibida para todas las personas. A una tasa 10 veces menor (1 Hz) se actualizan la velocidad deseada de cada agente y su nivel de pánico, pues se supone que el tiempo que necesita una persona para cambiar su estado mental no es inferior a un segundo.

El resto de las funciones se llaman dentro de la función principal **evacuate** (Pseudocódigo 1). Estas funciones se ejecutan para todas las personas en cada iteración. Estas son:

- **move**: Calcula y devuelve la componente de la velocidad deseada del agente para modelar el comportamiento de cohesión y alineamiento. Su pseudocódigo es Pseudocódigo 2.
- **goal**: Calcula y devuelve la componente de la velocidad deseada del agente para modelar la atracción que tiene a un determinado objetivo. Su pseudocódigo es Pseudocódigo 3.
- **panico**: Calcula y devuelve el nivel de pánico de cada persona. Su pseudocódigo es Algoritmo Pseudocódigo 4.
- **fuerzas**: Calcula y devuelve las fuerzas físicas y sociales que recibe cada persona por la influencia de otras personas. Su pseudocódigo es Pseudocódigo 5.

- **fuerzas_patches**: Calcula y devuelve las fuerzas físicas y sociales que recibe cada persona por la influencia de los obstáculos. Su pseudocódigo es Pseudocódigo 6.

A continuación, se especifica el modelo en pseudocódigo para que pueda ser trasladado a cualquier lenguaje de programación. Además, dicho ejercicio explica con detalle lo que se hace en cada iteración.

Pseudocódigo 1 evacuate

```

Inicializar el timer
if decisequundo = 10 then
    Poner a 0 las personas aterradas, personas asustadas, el pánico alto, el pánico mayor y la suma pánico
    for all personas do
        if no están heridas then
            Calcular la velocidad asociada objetivo
            Calcular la velocidad interacción agentes
            Actualizar la velocidad
        else
            panico = 1
            contador_panico_alto++
        end if
    end for
end if
velocidad_media_personas = 0
for all personas do
    if han llegado a la puerta then
        Se elimina a la persona
    end if
    if herido = 0 then
        Se calculan las fuerzas
        if modulo_fuerzas_total/(2*pi*r) > T then
            herido = 1
        end if
        Actualizar la aceleración
        Actualizar la velocidad dentro de los límites
        Actualizar la posición
        Calculamos velocidad media
    end if
end for
Realizar una espera hasta que transcurra una décima de segundo desde la inicialización del timer.

```

Pseudocódigo 2 move

```

Inicializar posicion_media, separación, alineamiento y obstáculos
Calcular posición media como el centro de masas del grupo considerado
Calcular el alineamiento como la velocidad media de las velocidades del grupo
Ponderar ambos términos de velocidad y devolver su suma

```

Pseudocódigo 3 goal (Velocidad hacia el objetivo)

```
if no tiene puertas localizadas then
  for all puertas do
    Calcular la distancia a la puerta
    if distancia a la puerta < visibilidad then
      Marcar la puerta como vista
    end if
  end for
end if
if si tiene alguna puerta localizada then
  Calcular la distancia a la puerta
  Calcular la velocidad a la puerta y la devuelve
end if
if sigue sin tener ninguna puerta localizada then
  for all puertas do
    Calcular la distancia a alguna puerta
    if Si encuentra una puerta de manera aleatoria, aunque esté fuera de rango then
      Se considera dicha puerta y se devuelve su velocidad hacia ella
    else
      Se devuelve una velocidad en dirección aleatoria
    end if
  end for
end if
```

Pseudocódigo 4 panico

```
Calcular la componente 1 del pánico, que depende de la distancia a la que está el agente de la puerta
Calcular la distancia del agente a la puerta que ve
Calcular la componente 2 del pánico, que depende de la diferencia de velocidades entre los vecinos y el propio agente
Calcular la componente 3 del pánico, que depende del nivel de disconformidad de los vecinos
Calcular la componente 4 del pánico, que aumenta inversamente proporcional a la velocidad del agente
Devolver el pánico
```

Pseudocódigo 5 fuerzas

```
Inicializar a 0 los componentes de las fuerzas de interacción entre agentes
for all agentes no heridos de un grupo do
  Calcular distancia entre agentes
  Calcular vector unitario que une dos agentes
  Sumar la anchura de dos agentes
  Calcular el termino 2 y 3 de la fuerza
end for
for all agentes heridos de un grupo do
  Calcular distancia entre agentes
  Calcular vector unitario que une dos agentes
  Sumar la anchura de dos agentes
  Calcular el termino 2 y 3 de la fuerza dividiendo entre una ponderación de heridos
end for
Calcular la fuerza total
Devolver la fuerza
```

2.3. Conceptos de diseño

Las personas en las multitudes, al igual que otros animales, muestran un comportamiento de rebaño y siguen a otras personas sin pensar, lo que puede provocar estampidas. El comportamiento de las multitudes, que suele ser ordenado, puede ser completamente diferente y muy descoordinado durante una evacuación de emergencia, debido al pánico y al miedo. Por lo tanto, se necesita un mecanismo para gestionar las multitudes en estas situaciones. Una opción ampliamente considerada actualmente es tener suficiente personal de asistencia para ayudar a la multitud durante la evacuación. En otros lugares no tan grandes, sin embargo, se confía únicamente en la señalización y en las salidas de emergencia.

Los modelos matemáticos desempeñan un papel importante en la explicación de la dinámica de las evacuaciones, y ayudan a tomar mejores decisiones respecto a la planificación de la evacuación. Hay dos grandes tipos de modelos en uso:

- **Modelos macroscópicos**, que dan ecuaciones matemáticas que describen la dinámica de la fuga.
- **Modelos basados en el individuo**, como los enfoques de autómatas celulares para dinámicas moleculares o los modelos basados en agentes.

La modelización basada en agentes es muy eficaz a la hora de plantear preguntas como “qué pasaría si” sobre el comportamiento de las multitudes. En casos en los que las personas sufren un riesgo, es aún más importante debido a la falta de experimentos en la vida real. Además, es más fácil simular comportamientos cognitivos (como la aparición y las causas del pánico, la heterogeneidad de los agentes, las comunicaciones entre ellos, etc.) mediante un modelo basado en agentes (ABM). Es por ello por lo que analizamos nuestro modelo mediante este enfoque.

El objetivo de nuestro trabajo es proporcionar un marco de análisis de estrategias para evacuaciones seguras (usando un ABM). Pretende ser una ayuda para diseñar estrategias de evacuación. Con este enfoque, es posible identificar los cuellos de botella en los planos de las áreas construidas. También comparar y evaluar diferentes diseños de las puertas de salida con respecto a sus propiedades, como posición, anchura y número de puertas (si hay más de una). Nuestras evaluaciones tienen en cuenta los tiempos de evacuación y los niveles de incomodidad física de los agentes humanos en el entorno, y nos permiten modelar y cuantificar el efecto del pánico generado entre los humanos durante situaciones de evacuación críticas en las que está su vida en juego.

Para incorporar los aspectos cognitivos, nuestro modelo permite identificar la causa y los efectos del pánico, considerando que está asociado a ciertos factores como:

- la distancia a la puerta de salida,
- la velocidad de los vecinos que se dirigen hacia la salida,
- el número de agentes cercanos que tienen un alto grado de malestar físico.

La velocidad de un agente es un vector; si la dirección de un agente no está alineada con la de sus compañeros, o si su velocidad es inferior a la de los agentes cercanos, entonces su nivel de pánico aumenta. Debido a la naturaleza social de la incomodidad física humana, cualquier

lesión, incomodidad o malestar grave entre los agentes cercanos también afecta al nivel de pánico de un agente.

Para modelar la interacción entre las personas, se hace uso del modelo de fuerzas sociales y físicas de [HM95], que tiene en cuenta la influencia física y psicológica que las personas se ejercen mutuamente. Esta fuerza provoca, aplicando la segunda ley de Newton, una aceleración en cada agente, que modifica a su vez sus propiedades de velocidad y posición.

2.3.1. Emergencia

Como hemos comentado en el apartado anterior, los agentes se agrupan con otros agentes formando diferentes grupos. Esta propiedad emerge de los diferentes agentes por estar unos cerca de otros. En nuestro modelo, para cada agente, se considera una zona para la cual este es influido por los demás agentes. Además, dependiendo de la influencia que consideremos (pánico de los vecinos, velocidad de los vecinos, etc.) se determinan diferentes extensiones de las zonas de influencia. La consideración de los distintos factores tiene como consecuencia una modificación de la velocidad deseada del agente. Cada factor que modifica la velocidad deseada de un agente constituye un sumando en el cálculo de esta, que está además ponderado mediante un *factor de refinado*. Este último indica la importancia relativa entre los distintos factores que influyen en la velocidad del agente. Por ejemplo, el término de la velocidad hacia el objetivo del agente (como la puerta de salida) influye en la velocidad deseada del agente, y su influencia se modela con el *factor de refinado* correspondiente.

Además, relativo a la emergencia, en nuestro modelo observamos que la presencia de obstáculos en un determinado escenario (frente a su ausencia) aumenta considerablemente el tiempo total de evacuación y el malestar general de los individuos. Otros factores que influyen notablemente en los resultados de la simulación (como el tiempo de evacuación o número de heridos) son el módulo máximo de la velocidad real de cada persona (**v_max**) y el módulo máximo de la velocidad deseada del agente (**v_max_desired**). Se observa el efecto de “más es menos” mencionado en [HM95], que indica que, en ocasiones, para mayores velocidades (reales o deseadas) el tiempo de evacuación disminuye.

2.3.2. Adaptación

La adaptación de los individuos al escenario en que se encuentran se tiene en cuenta en el modelo mediante *los factores de refinado*, que son propiedades de cada agente. Estos se utilizan para ponderar la influencia que tiene cada componente de su velocidad, y son los siguientes:

$$\begin{aligned} m_i^g &\equiv \text{factor objetivo} \\ m_i^c &\equiv \text{factor de cohesión} \\ m_i^l &\equiv \text{factor de alineación} \end{aligned}$$

El *factor objetivo* pondera la componente de la velocidad que hace que el agente se dirija a la puerta; el *factor de cohesión* se encarga del término que hace que el agente se dirija hacia el centro de masas de su grupo y el *factor de alineamiento* tiene en consideración la velocidad media de los agentes en un grupo, que tiene en cuenta cada agente perteneciente a dicho grupo.

Cada una de estas componentes puede variar para cada escenario e incluso en diferentes partes de un mismo escenario. Por ejemplo, en zonas estrechas, incrementar el *factor de alineamiento* puede ser una buena opción, ya que los agentes deberían formar filas para poder salir de dicha zona, y por tanto avanzar a una velocidad similar. En zonas más anchas, sin embargo, incrementar el *factor de cohesión* es más lógico, ya que los agentes en grupos llegan más rápido a la salida y es una mejor aproximación a la realidad. En los experimentos más simples que consideramos en el modelo, sin embargo, los factores son constantes e iguales para cada agente.

Por otro lado, la velocidad de los individuos también cambia con el pánico que estos sufren. Si el pánico de un individuo es mayor que un cierto valor límite, la única componente de su velocidad que influye en su movimiento es la que lleva al individuo al centro de masas del grupo en el que se encuentra.

2.3.3. Objetivos

El objetivo que persigue cada individuo es evacuar de la zona lo antes posible. Para ello, se modela su velocidad deseada en base al comportamiento de las personas en situaciones de pánico, rectificando su velocidad real. El grado de cumplimiento de los objetivos, sin embargo, no se mide a nivel individual, si no que son resultados emergentes de todos los individuos como colectivo. En las diferentes simulaciones que se desarrollen empleando nuestro modelo se tratarán de minimizar:

- El tiempo de evacuación para todos los individuos que no han sufrido daños tales que impiden su movimiento.
- El número de individuos que no consiguen evacuar por acabar inhabilitados.

2.3.4. Predicción

En este modelo no se considera que los agentes predigan ningún instante futuro, ya que sus posiciones futuras se calculan en base a su posición y velocidad actuales. Además, sus acciones tienen en cuenta únicamente el estado actual del resto de agentes y su estado de pánico en ese mismo instante. El hecho de que los agentes se encuentren en una evacuación de emergencia, bajo los efectos del pánico, hace que sea innecesario modelar posibles predicciones inteligentes de cada agente. Más aún, estas predicciones serían difíciles de estimar debido a la incertidumbre y el estrés que conlleva este tipo de situaciones. En definitiva, se ha considerado suficiente la aproximación de que los agentes solo tengan en cuenta su estado actual para determinar su instante futuro.

2.3.5. Percepción

Los agentes perciben otros agentes u obstáculos que se encuentran dentro de un determinado radio de influencia. En el modelo, se consideran diferentes radios para distintos tipos de influencia:

- Distancia considerada para cohesión (d_c) [m]: Un agente intentará dirigirse al centro de masas que conforman los agentes cercanos a este. Se considera un agente cercano si la distancia que los separa es menor o igual a d_c .
- Distancia considerada para alineamiento (d_l) [m]: Igual que el radio anterior, pero en este caso el agente no se dirige al centro de masas de los agentes cercanos, si no que imita su velocidad en cierta medida.
- **visibilidad**: la visibilidad es una propiedad que tiene cada puerta. Una puerta es percibida por un agente si este se sitúa a una distancia menor o igual que **visibilidad** con respecto a ella y además el pánico del agente es menor que un determinado valor límite. Si el pánico del agente supera dicho límite, el agente únicamente sigue el comportamiento de cohesión.

2.3.6. Interacción

La interacción entre personas y entre las personas y el entorno (obstáculos, paredes y puertas) es esencial para el modelado. Se diferencian dos tipos de interacciones:

- Interacciones físicas: Modelan la influencia física que tienen las diferentes personas y los obstáculos en cada persona. Se reflejan en la fuerza física que recibe cada agente, y se miden en unidades de Newtons. Esta fuerza afecta a algunos parámetros propios de cada persona, como el pánico, la velocidad actual, la aceleración o la posición.
- Interacciones sociales: Modelan la influencia psicológica que tienen las diferentes personas y los obstáculos en cada persona. Se manifiestan en distintos parámetros propios de cada agente, influyendo estos a su vez en otros parámetros. Uno de los factores que modela esta interacción es la fuerza social, que también tiene unidades de Newtons y afecta de igual forma que la fuerza física. Esta fuerza social modela que los agentes tratan de mantener una distancia mínima de separación con otros agentes (tanto obstáculos como personas). Otra consideración que modela la interacción social entre personas es que se tiene en cuenta en el pánico, pues se tiende a contagiar el nivel de pánico a las personas cercanas. La velocidad deseada de cada agente es influida por la velocidad y posición del resto de agentes, por lo que la interacción social también se modela mediante este factor.

2.3.7. Aleatoriedad

Los únicos parámetros aleatorios que definen el modelo son la posición inicial de cada agente, su anchura y su peso; los cuales vienen dados por valores aleatorios resultantes de distribuciones normales. Estas aleatoriedades son exclusivas de la etapa de inicialización.

En el desarrollo de la simulación, las actuaciones que realizan todos los agentes, así como sus interacciones, son deterministas. Sin embargo, cabe señalar que la influencia de estos parámetros iniciales aleatorios hace que cada simulación sea diferente, como ocurriría en escenarios reales. Sin embargo, la influencia de estas aleatoriedades no influye significativamente en los resultados finales de interés.

2.3.8. Colectivos

La formación de grupos es una propiedad emergente de este modelo, ya que las personas tienden a formar colectivos debido al término de cohesión considerado en su velocidad. Además, como se ha comentado anteriormente, cada persona afecta a (y se ve afectada por) otras personas que se encuentren dentro de su radio de influencia. Este radio de influencia crea dichos colectivos que, dependiendo de la influencia considerada, incluyen mayor o menor número de personas.

Además, se aprecia la aglomeración de agentes en torno a las puertas de salida. Este efecto no se ha modelado explícitamente, sino que es un resultado emergente de la simulación.

2.3.9. Observación

Los resultados generados durante la simulación, que pueden ser posteriormente analizados para evaluar la estrategia de evacuación considerada, son:

- número de personas evacuadas,
- número de personas aterradas y número de personas asustadas,
- velocidad de las personas,
- fuerzas que sufren las personas no heridas,

- fuerzas que sufren las personas heridas,
- pánico de las personas y
- tiempo de evacuación.

El resultado de la simulación puede servir para medir como de preparada está una sala con unas características específicas (como el número de puertas y su visibilidad, los obstáculos o el aforo máximo permitido) frente a una situación de emergencia en la que todo el mundo tuviera que evacuar. Otro efecto que puede analizarse de forma visual es la existencia de *cuernos de botella* en algunas zonas del escenario. Este es el caso en el que muchas personas se aglomeran en torno a una puerta, lo cual es peligroso debido a la fuerza que se ejercen mutuamente. Este factor es crítico a la hora de decidir la ubicación, el número y el tamaño de las salidas de emergencia consideradas en el diseño de la sala.

2.4. Inicialización

Para iniciar el modelo se tienen varias opciones, o bien se selecciona uno de los seis escenarios preestablecidos o bien se inicializa uno aleatoriamente. A continuación, se explican ambos casos y después se detallan los parámetros que deben establecerse. La primera opción es seleccionar uno de los seis estados descritos en [TR18].

- A. Una sola salida en el centro de una de las paredes con visibilidad total.
- B. Dos salidas en el centro de dos paredes opuestas con visibilidad media.
- C. Dos salidas en el centro de dos paredes opuestas con visibilidad media y baja.
- D. Dos salidas en las esquinas izquierdas de la misma pared con baja visibilidad.
- E. Dos salidas en esquinas opuestas con visibilidad media.
- F. Una salida en el centro de una de las paredes con visibilidad completa y obstáculos.

La segunda opción es introducir los parámetros deseados y que se genere el escenario aleatoriamente, para lo que pueden establecerse los siguientes parámetros:

- **nSalidas**, el número de salidas a añadir en el escenario. Se colocarán de manera aleatoria en la sala.
- **visibility**, vector que corresponde al radio de visión (en porcentaje) de cada salida.

Es importante destacar que ambas opciones no son excluyentes, es decir, se puede preestablecer un escenario y luego modificarse.

Por último, se puede modificar tanto el número de personas (**numero_personas**) como las variables **v_max_desired_inicial**, **v_max** y **T**, comentadas en la Subsección 2.1. Además, pueden añadirse obstáculos de manera manual con la instrucción **Obstáculos Manuales**.

Una vez se tienen todos estos parámetros ajustados, ya sea seleccionando un estado predefinido o manualmente, se puede ejecutar el **Setup** que colocará de manera aleatoria a las personas en la sala, definiendo sus propiedades como se explica en la Subsubsección 2.3.7.

Todas estas opciones son accesibles a través de la interfaz gráfica del modelo, que podemos observar en la Figura 1.

Y en la tabla Tabla 1 están recopiladas todas las variables y parámetros que se han usado durante el modelado, junto con su valor de iniciación. Las variables que tienen una estrella en su valor significa que son variables que puede cambiar el usuario desde la interfaz de la aplicación.

Evacuaciones de Emergencia Considerando el Comportamiento Humano en Pánico

Los ejemplos del artículo pueden configurarse directamente con los siguientes botones:

- A: Una sola salida en el medio que todo el mundo puede ver.
- B: Dos salidas en el medio con visibilidad media.
- C: Dos salidas en el medio con visibilidad media y baja.
- D: Dos salidas en las esquinas izquierdas con baja visibilidad.
- E: Dos salidas en esquinas opuestas con visibilidad media.
- F: Una salida en el medio con visibilidad completa y obstáculos.

A	B	C	D	E	F
numero_personas	v_max_desired_inicial	v_max	T		
500	2	1.95	20000		
Obstaculos Manuales	Manual	nSalidas	visibilty		
		1	[1]		
Setup	Evacuate	Reset			

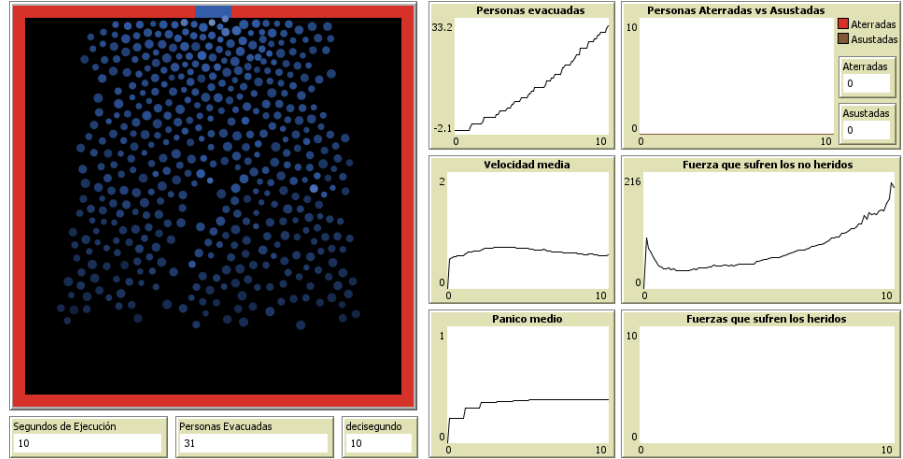


Figura 1: Interfaz del modelo en *NetLogo*.

Variables globales		
Nombre de la Variable	Descripción	Valor
LxL	Tamaño del espacio	33x33*
L_max	Máxima distancia a la que pueden estar dos puntos de la sala	$L\sqrt{2}$
numero_personas	El número de personas en la simulación	500*
v_min	Velocidad mínima permitida	0.35
v_max	Velocidad máxima permitida	1.95*
v_max_desired_inicial	Módulo máximo de la velocidad deseada	2*
T	Fuerza límite que recibe una persona para no poder moverse	20000*
A	Coefficiente de repulsión	2000
B	Longitud de caída	0.08
tau	Factor de relajación	0.5
k1	Constante de fuerza del cuerpo	12000
k2	Constante de fuerza de fricción y deslizamiento	24000
Variables intrínsecas de los agentes		
Nombre de la Variable	Descripción	Valor
r	Radio de las personas	Aleatorio entre 0.25 y 0.4
w	Peso de una persona	Aleatorio entre 40 y 80
l	Distancia máxima de seguridad	$10 * r$
d.c	Distancia de cohesión	$8 * r$
d.l	Distancia de alineamiento	$4 * r$
m.g	Parámetro asociado al objetivo	6.5
m.c	Parámetro asociado al comportamiento de “rebaño”	1.5
m.l	Parámetro asociado a la alineación	1.5

Cuadro 1: Descripción de las variables y sus valores de iniciación.

2.5. Submodelos

A continuación, se describirá el modelo de forma detallada. Para ello, se explicará como se han modelado los siguientes factores: fuerzas sociales, fuerzas físicas, pánico y velocidad deseada de cada agente. Se comentarán también las funciones de la Subsección 2.2 donde se modelan estos efectos. Finalmente, se explicará como se calcula el módulo de la velocidad deseada de cada agente, actualizándose cada segundo.

1. **Fuerzas sociales:** Como se ha comentado en apartados anteriores, en este modelo se han considerado fuerzas sociales y físicas. Ambas se han extraído de [HM95], donde se detallan. Además, se ha hecho una modificación que se comentará más adelante. Las fuerzas sociales modelan:

1.1 Distancia mínima de separación que un agente quiere mantener con el resto de personas: Es una fuerza repulsiva entre agentes, y se calcula como la suma de todas las fuerzas provocadas por cada agente j en cada agente i , $F_{soc_{ij}}$. Se mide en Newton y tiene la siguiente expresión:

$$F_{soc_{ij}} = A_i e^{\frac{r_{ij} - d_{ij}}{B_i}} n_{ij}$$

Donde:

$A_i \equiv$ Constante que denota la fuerza de interacción

$B_i \equiv$ Constante que denota el rango de las interacciones repulsivas

$d_{ij}(t) \equiv$ Distancia entre los centros de masas de los peatones i y j

$r_{ij} \equiv$ Suma de los radios r_i y r_j de los peatones i y j

$n_{ij} \equiv$ Vector normalizado que apunta del peatón j al peatón i

1.2 Distancia mínima de separación que un agente quiere mantener con los obstáculos: Esta fuerza es del mismo tipo que la anterior, simplemente cambiando el subíndice j por el subíndice k , referido a los obstáculos.

1.3 Aceleración que ejerce cada agente sobre sí mismo para mantener su velocidad deseada:

Se definen:

$v_i^0(t) \equiv$ Vector que indica la velocidad deseada del agente

$v_i(t) \equiv$ Vector que indica la velocidad actual del agente

$\tau_i \equiv$ Tiempo de relajación

$w_i \equiv$ Peso de la persona

$panico_i \equiv$ Pánico de la persona

Y la fuerza social F_{soc_i} asociada a este comportamiento tiene la forma

$$F_{soc_i} = w_i \frac{v_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i - \frac{panico_i}{3}}$$

donde τ_i modela la fuerza con la que el agente intenta mantener su velocidad deseada. Esta fuerza social tiene unidades de Newton. La influencia del pánico se ha añadido en esta fuerza en este modelo, no ocurriendo en [HM95]. Esto es porque se considera que un agente ejercerá más fuerza en la dirección de su destino en función del nivel de pánico que tenga.

2. **Fuerzas físicas:** Además, como en evacuaciones en masa las personas tienen contacto físico entre ellas, es necesario contemplar las fuerzas físicas que se ejercen unas a otras por contacto. Estas son las más peligrosas, pues pueden causar que las personas sufran fuertes daños o incluso mueran. En lo que sigue, la función $\Theta(z)$ es igual a z si $z \geq 0$, y 0 en otro caso. Se consideran dos términos de fuerzas que sufre un agente i por contacto con otro agente j :

2.1 El primer término es llamado **body force**, y modela la compresión de los cuerpos. Tiene la siguiente expresión

$$k_1 \Theta(r_{ij} - d_{ij}) n_{ij}$$

donde la constante k_1 es una constante de valor elevado que denota los efectos de obstrucción en las interacciones físicas.

2.2 El segundo término impide el movimiento tangencial relativo. Recibe el nombre de **sliding friction force**, y tiene la expresión

$$k_2 \Theta(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ij}^t t_{ij}$$

donde k_2 es una constante del mismo tipo que k_1 que denota la intensidad de la obstrucción, $t_{ij} = (-n_{ij}^2, n_{ij}^1)$ es la dirección tangencial y $\Delta v_{ij}^t = (v_j - v_i) t_{ij}$ es la diferencia de velocidad tangencial.

Además, los dos términos anteriores se refieren al contacto entre dos agentes, pero las fuerzas también pueden ejercerse entre un agente y un determinado obstáculo o pared referido con el subíndice k . Se consideran los dos términos anteriores también para estos casos de contacto, cambiando el índice j por el índice k , quedando:

$$k_1 \Theta(r_{ik} - d_{ik}) n_{ik} + k_2 \Theta(r_{ik} - d_{ik}) \Delta v_{ik}^t t_{ik}$$

Finalmente, la fuerza total F_i que recibe un agente i en una evacuación en pánico, considerando fuerzas físicas y sociales, tiene la expresión

$$F_i = w_i \frac{v_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i - \frac{\text{panico}_i}{3}} + \sum_{j \neq i} \left(A_i e^{\frac{r_{ij} - d_{ij}}{B_i}} n_{ij} + k_1 \Theta(r_{ij} - d_{ij}) n_{ij} + k_2 \Theta(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ij}^t t_{ij} \right) + \sum_k \left(A_i e^{\frac{r_{ik} - d_{ik}}{B_i}} n_{ik} + k_1 \Theta(r_{ik} - d_{ik}) n_{ik} + k_2 \Theta(r_{ik} - d_{ik}) \Delta v_{ik}^t t_{ik} \right)$$

Esta fuerza afecta directamente a la aceleración del agente, que se calcula mediante la segunda ley de Newton, determinándose de igual forma la velocidad y posición de cada persona mediante incrementos. Estos incrementos temporales se consideran en una décima de segundo.

También, para cada agente, se determina un límite T , medido en N/m . Si su disconformidad (fuerza que sufre entre su circunferencia) es superior a T , se considera que este agente queda inmovilizado para el resto de la simulación. Por último, la fuerza que recibe cada agente influye en su nivel de pánico. Este aumenta de forma proporcional al número de personas cercanas al agente que sufren una disconformidad mayor que T .

3. **Pánico:** El pánico se ha modelado de igual forma que en [TR18]. Está normalizado, siendo su valor un número entre 0 y 1. Para su formulación, puede consultarse [TR18] o el código proporcionado en *Netlogo* [GOJGMB⁺21]. El efecto de este fenómeno tendrá

consecuencias en la velocidad de la persona, pues si su nivel de pánico es mayor que 0.5, su velocidad deseada únicamente tendrá en cuenta el término de cohesión. Se entiende que, bajo los efectos del pánico, las personas no tienen un comportamiento racional, y tienden a empujar. Se intenta modelar la incoherencia en el movimiento de las personas bajo los efectos del pánico.

Depende de los siguientes factores:

- La distancia de una persona a una salida.
- Diferencia de su velocidad con la de su grupo.
- Disconformidad física provocada por las fuerzas físicas y sociales.
- Retraso de su velocidad con respecto a la de sus vecinos.

4. **Velocidad deseada:** La velocidad deseada de cada agente es la suma de dos términos ponderados: La velocidad del agente hacia el objetivo v_{goal} y la velocidad del agente por influencia de otros agentes v_m .

4.2 Velocidad del agente hacia el objetivo, v_{goal} : Es la velocidad que tiene cada agente en dirección al objetivo que quiere alcanzar. En escenarios simples, esta velocidad es la que tiene el agente en dirección a la puerta de salida que ha visto. En la función *goal* se explica como se calcula para estos casos. En escenarios más complejos, en los que se requiere que cada agente establezca objetivos intermedios anteriores a la salida definitiva, la definición de la velocidad v_{goal} es más compleja. Se propone que su valor se determine mediante una función del tipo v_{goal} , pero donde se consideren las condiciones propias del escenario y la estrategia a evaluar.

Esta velocidad contribuye a la velocidad deseada de cada agente como un sumando ponderado por el factor m_g .

4.2 Velocidad del agente por influencia de otros agentes, v_m : Esta velocidad es el resultado de la función *move*. Es la suma ponderada de dos términos: La velocidad de alineamiento y la velocidad de cohesión. La velocidad de alineamiento es la velocidad media de los vecinos, mientras que la velocidad de cohesión es la velocidad que tiene cada agente en dirección al centro de masas de su grupo. Ambas velocidades se suman a la velocidad deseada de cada agente, ponderadas por los términos m_l y m_c (para alineamiento y cohesión, respectivamente).

Finalmente, se explica como se calcula el módulo de la velocidad deseada de cada agente. Se considera una mejora respecto de los modelos [HM95] y [TR18], que consideran el módulo de esta velocidad deseada constante en toda la simulación. Este factor es muy importante, ya que determina el módulo de la aceleración que cada agente ejerce en dirección a su objetivo, y por tanto también el módulo de la fuerza. La fuerza que ejercen y sufren los agentes condiciona, en gran medida, los siguientes resultados del modelo, que son de principal interés:

- Posibles daños que sufren las personas.
- Tiempo de evacuación.
- Número de heridos totales.

Como la fuerza que ejercen los agentes es tan importante y el módulo de la velocidad deseada influye en gran medida en el cálculo de esta, se ha modelado este último término como dependiente del instante de tiempo y particular para cada agente, para mejorar la precisión del modelo. Tiene la siguiente expresión:

$$v_{deseada_i} = \frac{VMaxDesiredInicial}{contadorVecinos_i \cdot (1 - panic_i)}$$

Donde $VMaxDesiredInicial$ es el módulo máximo de la velocidad deseada que se considera para los agentes durante toda la simulación (si $v_{deseada_i}$ es mayor que dicho valor, satura); $contadorVecinos_i$ es el número de agentes visibles para el agente i ; y $panic_i$ es su nivel de pánico.

Cabe señalar que, para considerar un agente j como visible para el agente i , este debe encontrarse en el ángulo de apertura del segundo (cuyo valor viene dado por el parámetro $coseno_{max}$), en la dirección de avance del agente i , y a una distancia inferior a d_c del mismo (que es la distancia considerada para el comportamiento de cohesión).

En la expresión anterior puede observarse como, cuanto mayor es el pánico de un agente, más fuerza ejerce para intentar evacuar. También, cuanto mayor es el número de personas que tiene delante, menor es esta fuerza ejercida en dirección al objetivo.

3. Resultados

Se han recreado las simulaciones de [TR18], tomando los parámetros que se definieron en la Tabla 1. Todas las simulaciones se han realizado con los mismos parámetros, únicamente cambiando el estado inicial, tomándolos lo más realista posible. Para ello, se hace uso de la información de la bibliografía citada y de algunos parámetros (por ejemplo T) tomados de forma experimental.

Como se comentó en la introducción, las simulaciones se han recreado en *NetLogo*, ver Figura 2 y Figura 3. El pánico de las personas se representa con la tonalidad de azul que posee cada agente. Cuanto más oscuro es el azul de una persona mayor es el estado de pánico y, de igual forma, cuanto más claro menor será este. Las personas en rojo son personas que han recibido demasiada fuerza de su entorno y han acabado heridas. Las paredes y obstáculos se representan con cuadrados rojos, y las salidas con cuadrados azules.

A continuación se han recopilado los resultados de dichas simulaciones:

- A. El estado A tiene una sola puerta, pero todas las personas conocen su ubicación desde el inicio. Al comenzar, puede verse que las personas tienden a ir directamente a la salida. La existencia de una única salida provoca mayor agrupación de agentes y, por tanto, mayores serán las fuerzas que reciban individualmente. Esto hace que esta configuración sea la que reúna más gente herida, llegando incluso a 20 personas (de un total de 500). Las personas tardan unos 120 segundos en evacuar completamente en este estado.
- B. En el estado B existen dos salidas con visibilidad media. Las personas se dividen rápidamente en dos grupos, cada uno dirigido hacia una de las dos puertas. Es uno de los estados en los que las personas evacuan más rápido, tardando unos 70 segundos y teniendo un solo herido.
- C. El estado C cuenta con dos salidas, una con visibilidad reducida y otra con visibilidad media. Este escenario se parece bastante al primero, pero en él algunas personas (las cercanas a la puerta poco visible) evacuan más rápidamente. Esto hace que se reduzca tanto el tiempo de evacuación (unos 100 segundos) como el número de personas heridas (a menos de 10).
- D. El escenario D es el más complejo, ya que cuenta con dos salidas en dos de las esquinas de la sala con una visibilidad muy reducida. Esto hace que las personas tarden mucho tiempo en encontrar la salida, completándose la evacuación de la sala en unos 320 segundos. A su vez, que la evacuación sea tan lenta, hace que las personas no se ejerzan mucha fuerza entre ellas, por lo que en este estado no existe ningún herido.

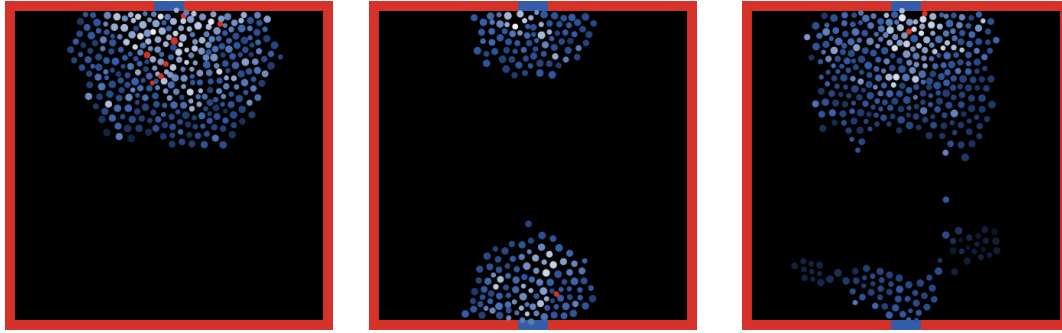


Figura 2: Simulaciones de los estados A, B y C. Las imágenes están tomadas en el segundo 40 para los estados A y B, y en el segundo 20 para el estado C.

- E. Este escenario cuenta con dos salidas en esquinas opuestas, ambas con visibilidad media. Al estar las salidas en las esquinas, como se puede ver en la Figura 3, se forman grandes cúmulos de personas en un espacio bastante reducido. Esto hace que haya mucha más interacción entre las personas, lo que conlleva un mayor número de personas heridas (entorno a 20) y un tiempo de ejecución más lento (unos 150 segundos).
- F. El escenario F es el que provoca peores resultados. La existencia y disposición de los obstáculos hace muy difícil la labor de las personas por evacuar. Tras 90 segundos de ejecución, se empieza a formar un *cuello de botella* bastante grande causado por los obstáculos y las personas heridas que hace bastante difícil al resto de los agentes su evacuación. En algunas ocasiones son capaces de evacuar con un tiempo mínimo de unos 150 segundos, pero en otras ejecuciones el *cuello de botella* es tan grande que no permite a la gente avanzar. Un ejemplo de esto se puede observar en la Figura 3.

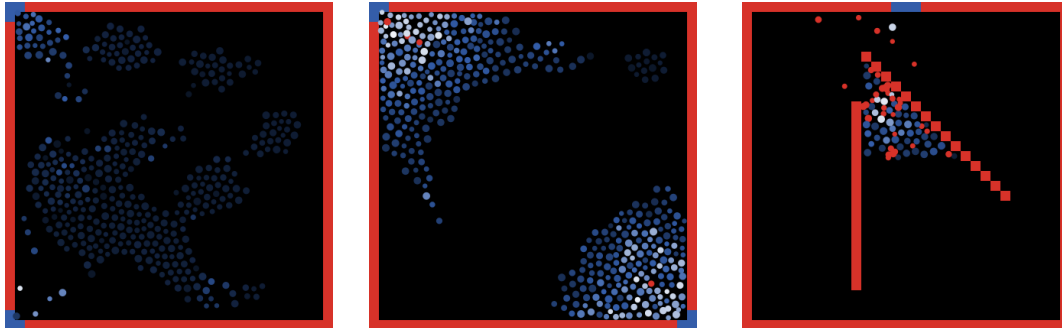


Figura 3: Simulaciones de los estados D, E y F. Las imágenes están tomadas en el segundo 20 para los estados D y E, y en el segundo 180 para el estado F.

Tanto los tiempos de ejecución como el número de personas heridas se han obtenido haciendo la media de varias ejecuciones. Si se volvieran a ejecutar las simulaciones estos valores podrían verse alterados ligeramente.

Se puede ver el interés del modelo en el siguiente *caso práctico*. ¿Qué ocurriría si se añade una barra de bar de 3x7 en el escenario A como vemos en la Figura 4?. A una sala o discoteca les puede interesar que lo primero que vean las personas que entran sea la barra del bar para incentivarlos a hacer alguna consumición. ¿Qué repercusión tendría esto en la seguridad de la sala?. Esta

pregunta la puede responder el modelado que se ha presentado. Simplemente debemos de añadir la barra en la posición deseada con la opción **Obstáculos Manuales** y ejecutar la simulación.

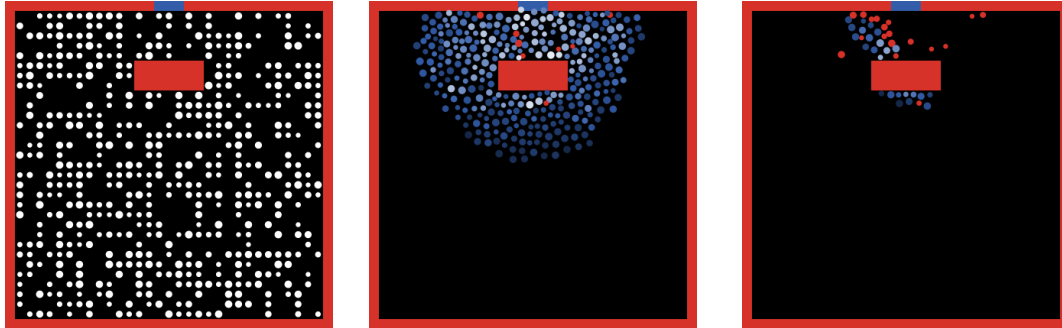


Figura 4: Simulación del *caso práctico* en el que se añade una barra al escenario A. La primera imagen es el estado inicial del ejemplo, la segunda tras pasar 40 segundos y la última tras pasar 130 segundos.

En la simulación puede observarse una mayor formación de *cuellos de botella*. Es más, dicho *cuello de botella* hace que bastantes personas no puedan evacuar y tras 180 segundos aún haya personas sin evacuar. Por tanto, podemos deducir que colocar la barra en la posición de la Figura 4 aumenta el tiempo de evacuación y aumenta la formación de *cuellos de botella*. Gracias al modelo desarrollado ya es posible contestar a la pregunta que se proponía antes, no es buena idea añadir una barra en esa posición.

4. Conclusiones

El modelado planteado permite predecir cualitativamente el comportamiento de las personas en una situación de pánico, lo que a su vez ofrece indicios de como se podría mejorar la seguridad ante una evacuación. Un pequeño ejemplo de esto es el que se propone en la sección anterior, donde se puede extraer información suficiente como para saber si es seguro disponer obstáculos en ciertas zonas de una sala.

Una posible mejora que se podría hacer al modelo, que no se ha presentado, podría ser la habilidad de crear puertas a petición del usuario, al igual que con los obstáculos. Esto permitiría poder evaluar donde es más eficiente tener ubicadas las puertas, aunque con el análisis que se realiza en el documento parece claro que las posiciones centrales favorecen la evacuación.

Referencias

- [GOJGMB⁺21] F.J. Gañán Onieva, F. Jiménez García, I Matos Bellido, Á. Molina Espejo, and J.A. Sánchez Díaz. modelopanico.nlogo. <https://github.com/isimatosbe/Trabajo-MCVA/blob/main/modeloPanico.nlogo>, 2021.
- [HFV00] Dirk Helbing, Illés Farkas, and Tamás Vicsek. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407(6803):487–490, 2000. URL: <http://dx.doi.org/10.1038/35035023>, doi:10.1038/35035023.
- [HM95] Dirk Helbing and Péter Molnár. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 51(5):4282–4286, 1995. URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.51.4282>, doi:10.1103/physreve.51.4282.

- [TR18] Ashutosh Trivedi and Shrisha Rao. Agent-based modeling of emergency evacuations considering human panic behavior. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 5(1):277–288, 2018. doi:10.1109/TCSS.2017.2783332.