

La física detrás de la evacuación de personas

Guillermo A. Frank¹, Claudio O. Dorso²

¹ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Unidad de Investigación y Desarrollo de las Ingenierías (UIDI), Av. Medrano 951, (C1179AAQ) Buenos Aires, Argentina

² Instituto de Física de Buenos Aires, Pabellón I, Ciudad Universitaria, 1428 Buenos Aires, Argentina

guillermo.frank@gmail.com

Recibido el 10 de junio de 2018, aprobado el 27 de julio de 2018

Resumen

Las catástrofes en eventos multitudinarios motivaron a investigadores en el área de las ciencias físicas a estudiar (y eventualmente prevenir) los fenómenos que surgen cuando se produce una situación de pánico. En particular, el modelo de Fuerza Social (SFM) es capaz de describir con realismo el comportamiento colectivo de un conjunto de personas, agregando los ingredientes específicos para cada situación. En este artículo seleccionamos tres fenómenos relevantes que se pueden dar en situaciones de pánico. Éstos tienen consecuencias paradójicas, y que habitualmente se ignoran al momento de prevenir catástrofes. Los fenómenos detallados son el *faster is slower* (más rápido es más lento), *faster is faster* (más rápido es más rápido), *clever is not always better* (lo inteligente no es siempre mejor) y los relacionados con sentimientos afectivos.

PALABRAS CLAVE: EVACUACIÓN - PÁNICO - BLOQUEO - MODELO DE FUERZA SOCIAL

Abstract

Disasters around multitudinous events called the attention of researchers in the field of Physics. Many were moved to study (and eventually prevent) phenomena associated to panic situations. Specifically, the Social Force Model (SFM) appears to be accurate enough for attaining the basics of the collective dynamics and seems to fit in a wide range of situations. This article focuses on three relevant phenomena somewhat paradoxical (and not entirely considered while designing evacuation strategies). The phenomena are: the faster is slower effect, faster is faster effect, the clever is not always better paradox, and effect related to attractive feelings between couples.

KEYWORDS: EVACUATION – PANIC – BLOCKING - SOCIAL FORCE MODEL

Introducción

La evacuación de individuos en situaciones de pánico suscita preocupación creciente debido al aumento sostenido de víctimas año tras año (Fruin, 1993). La problemática es antigua y ya se encuentra documentada en regulaciones mandatorias de la última dinastía Qing en China (1644-1911 D.C.) (Cheng, 2004). En ellas se establece la necesidad de dos puertas para casos de incendio.

Los eventos multitudinarios son los que más llaman la atención de investigadores y de la opinión pública en general. Recordemos que en el presente se cumplen 50 años de la tragedia de "Puerta 12", ocurrida en el estadio de River Plate (Buenos Aires, Argentina). En años más recientes sobresalen también las catástrofes del recital de Callejeros en el establecimiento "República Cromañón" (Buenos Aires, 2004) y del recital del Indio Solari en el predio "La Colmena" (Olavarría, 2017).

Desde hace varios años se desarrollan modelos de comportamiento de individuos en estado de pánico para recrear escenarios de riesgo e intentar prevenir catástrofes. Las primeras investigaciones consideraban a la multitud de individuos como un fluido o un gas (Henderson, 1971; Hughes, 2000). Sin embargo, este nivel de aproximación no resultó del todo adecuado para un sistema (humano) en el que no se conserva la energía o el momento total. Un modelo alternativo consistió en representar el movimiento de personas como si fueran entes magnéticos atraídos (magnéticamente) hacia los puntos de evacuación (Okazaki, 1993). El inconveniente con este modelo es que los parámetros que usa no son directamente estimables (es decir, no tienen un correlato directo con magnitudes medibles).

El modelo de (SFM) propuesto por Helbing y colaboradores (Helbing, 2000) aborda la problemática del movimiento de personas desde una perspectiva microscópica, es decir, como verdaderos entes que interactúan entre sí. Las interacciones tienen una naturaleza socio-sicológica y física (ver siguiente sección). El movimiento de los individuos es de tipo no coordinado y todos los individuos pueden presentar fluctuaciones de velocidad entre sí, o algún otro parámetro que los distinga.

El presente artículo trata algunos posibles es-

cenarios de evacuación de personas en estado de pánico, basándonos en el modelo de (SFM). La aproximación a esta problemática por medio de este modelo resulta atractiva por dos motivos: (a) permite la construcción e integración de ecuaciones formales cuyos parámetros mantienen un significado físico directo; (b) no se encuentran disponibles (hasta donde tenemos conocimiento) otros modelos que logren capturar un nivel de realismo similar al de la (SFM). En este sentido, los modelos de autómatas (i.e. modelos tipo "tablero de ajedrez") distan mucho del realismo del SFM, aunque son numéricamente más simples de resolver.

Se mostrará en la sección de Resultados que es posible identificar, por medio de la simulación numérica del SFM, las causas de tragedias ocurridas durante la evacuación. Algunos de estos resultados pueden hallarse en Frank y Dorso (2011, 2015). Se recomienda también la lectura de Parisi y Dorso (2005, 2007).

Marco teórico

El modelo de (SFM)

El modelo básico de Helbing (2000) propone que la dinámica peatonal es el resultado de la interacción de cada individuo con su propio ambiente (tanto de manera socio-sicológica como física) combinado con su deseo de dirigirse hacia un determinado lugar. Estos tres elementos alteran la dinámica de la persona de manera similar a como lo hacen las fuerzas en la ecuación de Newton

$$m_i dv_i/dt = f_s + f_g + f_d \quad (1)$$

donde:

f_s es la (SFM) de interacción con el ambiente (i.e. otros individuos, paredes, etc.),
 f_g es la fuerza granular o fricción física, y
 f_d es la fuerza de deseo.

La interacción con el ambiente o se basa en el principio de que la persona reacciona cuando ve vulnerada su esfera de privacidad. La esfera de privacidad es aquella distancia con los demás (o con los objetos) a la que nos sentimos cómodos. Si esta distancia se reduce, experimentamos una incomodidad y tratamos de alejarnos hacia una distancia más confortable. Por lo tanto, la esencia de este comportamiento socio-sicológico se identifica con una fuerza de tipo social que tiene un carácter repulsivo. Se

puede modelar como una función exponencial decreciente del siguiente modo:

$$f_s(ij) = A_i e^{(r_{ij} - d_{ij})/B_i} n_{ij} \quad (2)$$

donde:

i representa alguna de las partículas (peatones) y

j puede ser otra de ellas, o bien, una pared.

d_{ij} representa la distancia entre los centros de masa de los peatones.

n_{ij} es el versor en la dirección ji y $r_{ij} = r_i + r_j$ es la suma de los radios de los peatones i y j . Los parámetros A_i y B_i se fijan experimentalmente.

El balance entre la (SFM) y nuestro deseo de dirigirnos en una determinada dirección queda registrado habitualmente por la distancia de confort que mantenemos en distintas circunstancias. La distancia que nos separa con la persona de adelante en una cola de espera corresponde, por ejemplo, al balance entre nuestro deseo por avanzar y la necesidad por mantener nuestro espacio de privacidad. Esta distancia permite obtener valores experimentales de los parámetros A_i y B_i .

La fuerza de deseo que nos lleva a dirigirnos hacia un determinado objetivo puede ser más o menos intensa, según el nivel de ansiedad de la persona. Ésta es la aceleración requerida para pasar de la velocidad actual (incompatible con nuestro nivel de ansiedad) a la velocidad deseada v_d . La velocidad deseada es aquella en la que nos sentimos cómodos, según el nivel de ansiedad que tengamos. Por lo tanto, la fuerza de deseo es proporcional a la diferencia entre la velocidad deseada $v_d(t)$ y la velocidad actual $v(t)$ según la expresión:

$$f_d^{(i)} = m_i [v_d(t) e_d(t) - v_i(t)] / \tau \quad (3)$$

donde:

τ es un tiempo de relajación (estimado en 0,5 seg.),

e_d es el versor dirección de deseo y

m_i es la masa del individuo i .

El modelo incluye una fuerza de fricción (o fuerza granular) entre individuos en contacto, de la forma:

$$f_g(ij) = \kappa g(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ij} \cdot t_{ij} \quad (4)$$

donde:

$\Delta v_{ij} = v_j - v_i$ es la diferencia de velocidad entre los peatones i

j , y t_{ij} es el versor tangencial. κ es un parámetro experimental y $g(\cdot)$ es una función nula si $r_{ij} < d_{ij}$ o igual a su argumento en caso contrario.

Para una descripción más detallada de los parámetros, véase Parisi y Dorso (2005,2007).

Clusters sociales

La ecuación (1) representa la evolución temporal de cada persona dentro de una multitud. Esto conduce a la formación de estructuras transitorias de individuos que se encuentran en contacto entre sí. Estas estructuras o clusters sociales cumplen distintos roles dentro de la multitud, como por ejemplo, bloquear la salida de otros individuos.

Un clusters social se define como aquel grupo de personas G tal que si un individuo i pertenece al grupo, entonces existe otro individuo j del grupo que está en contacto con el primero (i). En términos formales

$$i \in G \Leftrightarrow \exists j \in G / d_{ij} < r_i + r_j \quad (5)$$

El cluster social que bloquea completamente una salida es el responsable por las demoras en los tiempos de evacuación. Dentro de este cluster social, resulta particularmente relevante el sub-conjunto mínimo de personas en contacto entre sí, que bloquean la salida de lado a lado. A este número mínimo lo identificamos como una estructura bloqueante.

Vínculo afectivo entre personas

Los vínculos afectivos entre personas son sentimientos de alguna manera opuestos a la (SFM). Mientras que esta última corresponde a la incomodidad debida a la invasión de nuestra esfera de privacidad, los vínculos afectivos corresponden a la comodidad que sentimos en compartir un espacio común con el otro. El vínculo afectivo actúa como una fuerza restitutiva, si este espacio común se rompe. Los sentimientos opuestos de preservación de la privacidad alcanzan un balance con los sentimientos opuestos de espacio común.

Según la argumentación dada en Frank y Dorso

(2016), el vínculo afectivo puede ingresar en la ecuación (1) como una fuerza adicional al modelo básico de Helbing (2000). La expresión es la siguiente

$$fa^{ij)} = (\epsilon/4D_i) \cosh^{-2}[(C_i - d_{ij})/(2D_i)] \quad (4)$$

donde:
 ϵ y C_i , D_i son parámetros ajustables.

El parámetro ϵ fija la amplitud de la fuerza, y por lo tanto, se interpreta como la "intensidad" del vínculo afectivo entre dos personas.

Métodos

La investigación de escenarios de evacuación de personas se realiza por medio de métodos computacionales, y en la medida de lo posible, se contrasta con datos obtenidos de material fílmico. La implementación computacional consiste en integrar numéricamente la ecuación (1) para cada individuo. Si se estudia una multitud de N individuos, entonces se deberá integrar temporalmente N ecuaciones instante a instante. Típicamente la integración temporal se realiza con un tamaño de paso de $\Delta t = 0,0001$ s. El integrador temporal usado es el de Verlet en velocidades.

$$\begin{aligned} r_i(t+\Delta t) &= r_i(t) + v_i(t) \Delta t + \frac{1}{2} a_i(t) \Delta t^2, \\ v_i(t+\Delta t) &= v_i(t) + a_i(t) \Delta t \end{aligned} \quad (6)$$

donde:

r_i , v_i y a_i son las posiciones, velocidades y aceleraciones, respectivamente.

Las aceleraciones se obtienen a partir de la evaluación de todas las fuerzas entre individuos (y con los obstáculos). La velocidad deseada $v_{d,i}(t)$ debe actualizarse con cada paso temporal. Ésta se fija según la estrategia asignada a cada individuo. La estrategia más simple posible consiste en asignarle a cada individuo una velocidad deseada $v_d(t)$ con dirección hacia la salida de emergencia más cercana. Pero son posibles otras, como seguir a un líder (comportamiento "en manada"), o bien, elegir entre múltiples salidas según el nivel de congestión en cada una.

En la Figura 1 se muestra un instante en la evacuación de 225 personas, a través de una única salida. Esta escena ejemplifica la estrategia correspondiente a que todos los individuos se dirigen a un lugar común (la salida). El cluster resaltado en otra tonalidad corresponde al número mínimo de personas capaces de impedir (bloquear) el paso de los demás, provocando una demora en la evacuación.

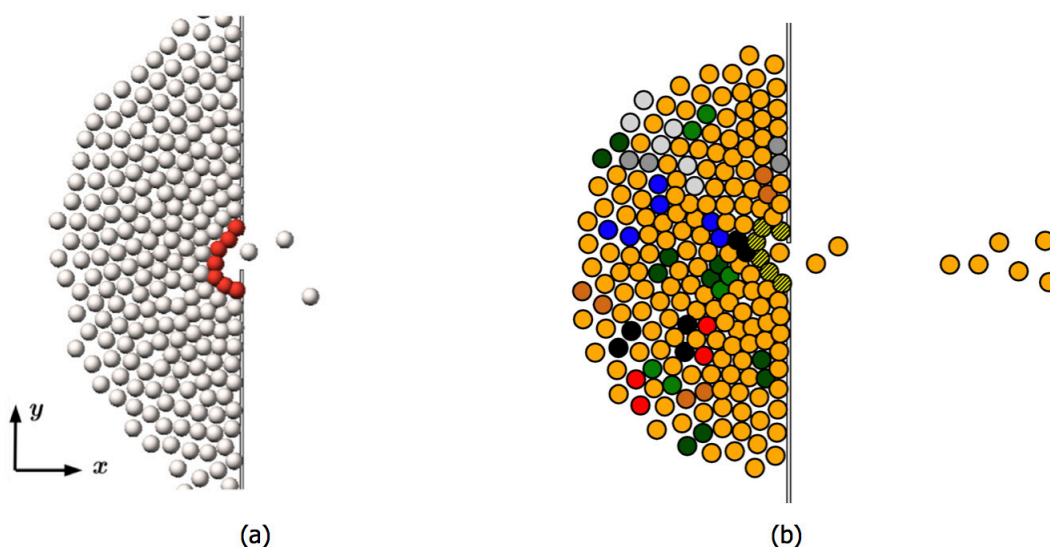


Fig. 1. Escena de evacuación de 225 personas (en un recinto de 20 m x 20 m) a través de una puerta de 1,2 m. El módulo de la velocidad de deseo es 4 m/s. (a) Se resaltó el conjunto de individuos que bloquean la salida, impidiendo el paso de los demás. Este conjunto se definió como "estructura bloqueante" en la sección correspondiente a los clusters sociales. (b) Escenario similar al caso (a) pero con un 25% de individuos con algún tipo de lazo afectivo. Cada color indica los individuos unidos por un vínculo afectivo.

La simulación de un proceso de evacuación con individuos en estado de pánico se realiza del siguiente modo. Se parte de N individuos distribuidos uniformemente en un recinto con velocidad aleatoria (con módulo 1 m/s). En el instante $t=0$ se asignan las velocidades deseadas v_d (según el tipo de estrategia asignada a este escenario) y se deja evolucionar el sistema. Se toman muestras de posiciones y velocidades cada 0,05 s. El proceso se termina cuando una cierta cantidad de personas lograron evacuar. No se permite el reingreso de individuos en la simulación. Se repite este experimento una cierta cantidad de veces (recordar que las condiciones iniciales son aleatorias) y se efectúan los correspondientes promedios estadísticos de las magnitudes de interés.

En la siguiente sección se detallan algunas paradojas surgidas en distintos escenarios de evacuación.

Resultados

El efecto *faster is slower* (más rápido a más lento) y *faster is faster* (más rápido a más rápido)

En la Figura 2 se muestra el tiempo evacuación de aproximadamente 160 personas a través de una única salida como función de la velocidad de deseo v_d de los individuos. La situación es similar a la representada en la Figura 1(a).

Las curvas representadas en la Figura 2 corresponden al primer fenómeno reportado a partir del modelo de (SFM): el hecho de que cuanto mayor es la ansiedad de una multitud por escapar a través de una salida (i.e. mayor velocidad de deseo v_d), mayor es el tiempo que demoran en hacerlo (efecto *faster is slower*). Observar en la Figura 2(a) que esto ocurre para la región de $v_d > 1$ m/s. Los tiempos de evacuación crecen hasta velocidades de deseo de 6 m/s aproximadamente. Por el contrario, si la multitud sale con un bajo nivel de deseo (i.e. baja ansiedad por salir), los tiempos de salida se reducen con su interés por salir (ver región de $v_d < 1$ m/s en la Figura 2(a)).

Parisi y Dorso (2005,2007) definieron los clusters sociales y asociaron el fenómeno de *faster is slower* a los bloqueos producidos por un *cluster* mínimo de individuos entorno a la salida (llamadas "estructuras bloqueantes").

La presencia de estructuras bloqueantes de personas (como la mostrada en la Figura 1(a) en otro color) está vinculada, según el modelo de (SFM), al incremento de la fricción entre los individuos que bloquean el paso. Éstos están presionados por detrás por una multitud que empuja por salir, pero no pueden avanzar debido a la fricción con sus vecinos a ambos costados. De tanto en tanto, alguno de ellos logra liberarse y sale. Inmediatamente después, se

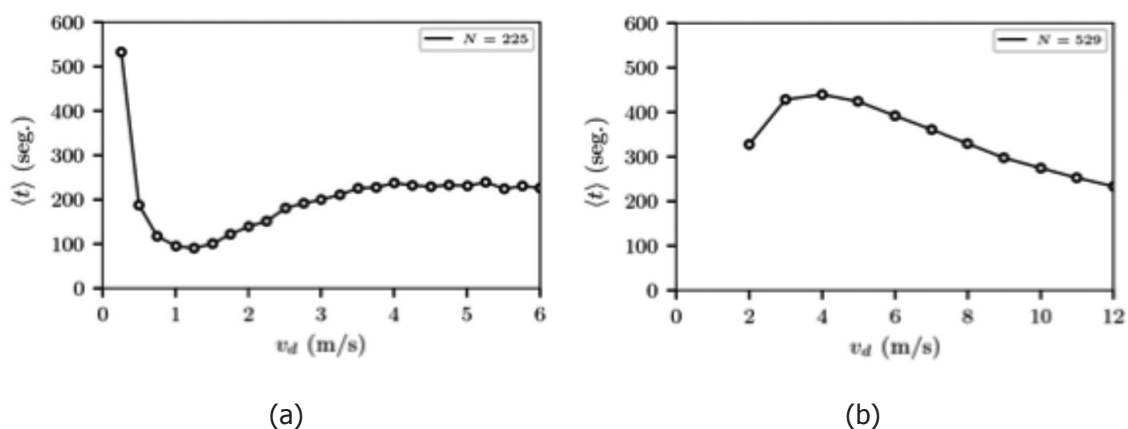


Fig. 2. Tiempo de evacuación de 160 individuos (s) como función de la velocidad de deseo v_d (todos los individuos tienen la misma velocidad de deseo en módulo, con dirección a la puerta). La puerta de salida es de 1,2 m. La cantidad inicial de individuos es: (a) de 225 personas para un recinto de de 20 m x 20 m y (b) de 529 personas para un recinto de recinto de 30 m x 30 m. El escenario es similar al mostrado en la Fig. 1. Los resultados corresponden a valores medios sobre 30 realizaciones.

forma otro bloqueo entre los que aún permanecen atrapados. Por lo tanto, el tiempo de evacuación es la suma de todas las demoras ocasionadas por la estructura bloqueante.

Si bien las mayores multitudes producen presiones mayores, el modelo de (SFM) prevé que los tiempos de huida disminuyen con el aumento de la cantidad de individuos en la multitud. En la Figura 2(b) se observa que para una multitud cercana a 500 personas, la pendiente de la curva faster is slower cambia de signo para $vd > 6$ m/s. Resultados similares se pueden observar en Sticco (2017) para multitudes entre 225 y 1000 personas. Este fenómeno corresponde a un régimen faster is faster, dado que cuanto mayor es el deseo por salir, más rápido lo hacen.

La existencia de un efecto faster is faster a altísimas presiones (y sin considerar que los individuos pueden desvanecerse por asfixia ante tanta presión) sólo puede estudiarse por medio simulaciones numéricas (por el momento). Éstas muestran que en este régimen, las estructuras de individuos bloqueantes se rompen con mayor facilidad. El balance de fuerzas dentro de estas estructuras indica que la fricción entre sus miembros no es capaz de contrarrestar la presión de la muchedumbre (aquella indicada en color blanco en la Figura

1(a)). Por lo tanto, los individuos bloqueantes son empujados (dificultosamente) hacia adelante, produciéndose roturas de la estructura más frecuentemente.

Si bien la Figura 2(b) parece indicar que es necesario estar ante un escenario con un nivel de ansiedad (i.e. velocidad de deseo) altísimo para alcanzar el efecto faster is faster, esto no es del todo cierto. Los eventos multitudinarios (de varios miles de personas) son capaces de generar presiones altísimas con bajos niveles de ansiedad. Por lo tanto, la física de multitudes (en particular el modelo de (SFM)) nos previene de que esto puede llegar a ocurrir.

La presencia de un obstáculo

Los obstáculos son una causa importante por la que individuos en pánico pueden cambiar su conducta. Algunas personas simplemente huyen en dirección a la salida, hasta chocar con un obstáculo. Otras, en cambio, pueden prever esta situación y esquivarlo. Analizamos ambos comportamientos, dentro del modelo de (SFM), del siguiente modo: se asumió que los individuos sin estrategia simplemente desean ir hacia la salida, mientras que aquellos con estrategia intentan dirigirse hacia los lados (más cercanos) del obstáculo que tienen delante. En la Figura 3 se ejemplifica esta situación para

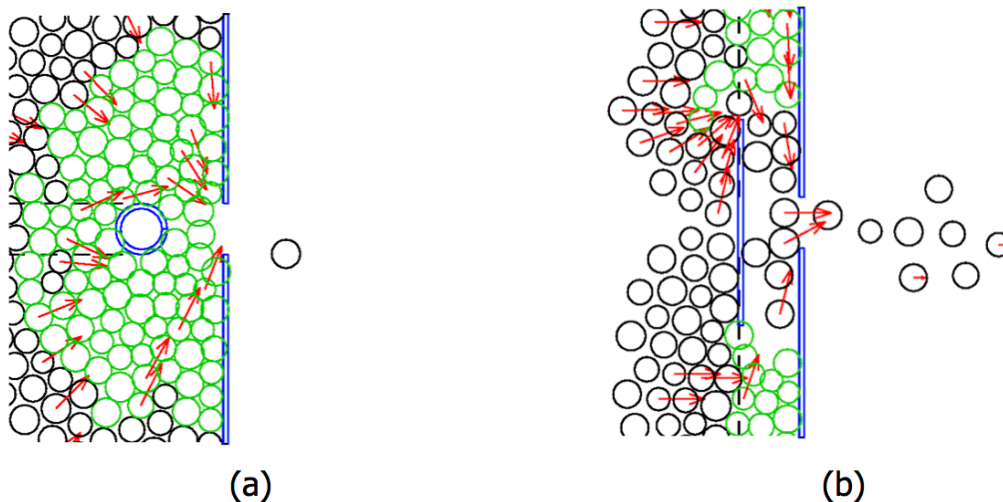


Fig. 3. Dos ejemplos de evacuación de 225 personas a través de una salida de $L=1,2$ m. (a) Se colocó un obstáculo circular de aproximadamente $1,2$ m de diámetro. (b) se colocó un obstáculo plano (paralelo a la salida) de aproximadamente $4,8$ m de largo. Ambos obstáculos se encuentran a $0,866 L$ ($L=1,2$ m) de la salida, medida desde el punto más cercano del obstáculo a la salida. Las flechas indican la dirección hacia donde desean ir los individuos (i.e. esquivan el obstáculo).

un obstáculo plano-paralelo a la salida. Para mayores detalles puede consultarse Frank y Dorso (2011).

Se estudiaron los tiempos que demora la evacuación para el caso de una columna circular y de un panel plano-paralelo. Se ubicaron ambos tipos de obstáculos en tres posiciones, de manera que su punto más cercano a la salida esté a 0,866 L, 1,1 L y 2 L (L=ancho de la salida), respectivamente.

En la Figura 4 se muestran los tiempos de evacuación para cada tipo y para individuos sin estrategia y con estrategia.

En la Figura 4 se observa que cualquiera sea la estrategia, los obstáculos (ubicados a 0,866 L) mejoran la performance de la evacuación si el nivel de ansiedad de los individuos hace que su velocidad de deseo v_d supere los 2 m/s. Esto es válido tanto para individuos sin estrategia como con estrategia. El obstáculo plano-paralelo parece mejorar aún más los tiempos de salida cuando el deseo por huir es muy alto.

Si bien los resultados mostrados en la Figura 4(a) son sorprendentes, no parecen ser óptimos. Es decir, la distancia que separa el punto más cercano del obstáculo con la salida podría regularse para mejorar aún más la performance de la evacuación. En la Figura 4(b) se muestran los tiempos de evacuación cuando el obstáculo plano-paralelo se ubica a 1,1 L. No

se muestran los resultados para un obstáculo en forma de columna circular porque no presentan interés.

Se observa en la Figura 4(b) que los dos tipos de comportamientos estudiados tienen tiempos de evacuación bien distintos para una separación de 1,1 L. Los individuos que huyen sin estrategia alcanzan la salida (en su conjunto) más rápido que aquellos que esquivan el obstáculo. Éste fenómeno es completamente inesperado, dado que la primera impresión indicaría que esquivar al obstáculo sería la estrategia más inteligente. El modelo de (SFM) (y la física asociada) muestra que otros efectos más complejos pueden ocurrir, como se detalla a continuación.

Si se observa (y registra) el instante que un grupo de individuos bloquea el paso de los demás (i.e. estructura bloqueante) y la distancia respecto de la puerta de ese bloqueo, se obtiene un conjunto de eventos como los mostrados en la Figura 5. Allí se representa la situación en que el panel plano-paralelo se encuentra a 1,1 L de la salida. Los gráficos superiores (casos (a) y (b)) corresponden a eventos de bloqueos registrados entre el obstáculo y la pared del recinto. Los gráficos inferiores (casos (c) y (d)) corresponden a eventos de bloqueos ocurridos únicamente alrededor de la salida (es decir, entre las paredes del recinto a ambos lados de la puerta).

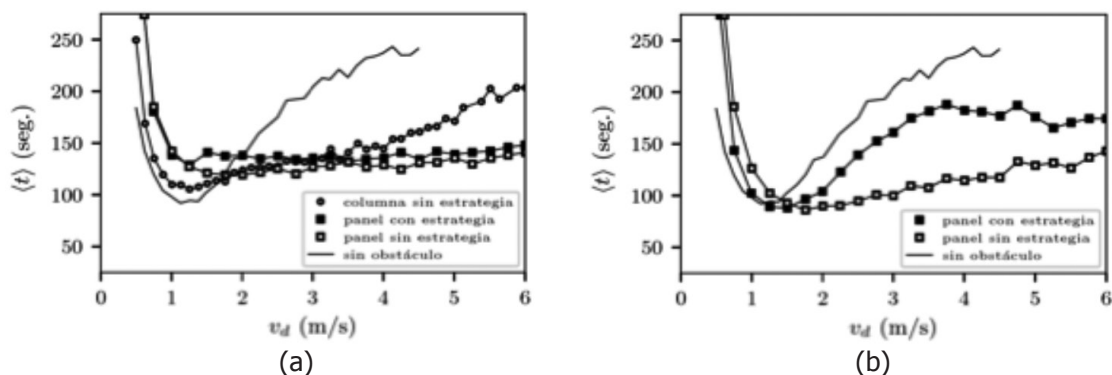


Fig. 4. Tiempo de evacuación (s) de 160 individuos como función de la velocidad de deseo v_d (m/s). La salida tiene $L=1,2$ m de ancho. (a) Un obstáculo se coloca delante de la puerta a una distancia 0,866 L. Las líneas con círculos corresponden a una columna, mientras que los rectángulos corresponden a un panel largo (paralelo a la salida). (b) Un obstáculo en forma de panel se coloca delante de la puerta a la distancia de 1,1 L. En ambos gráficos los símbolos llenos (en negro) representan una situación en que los individuos intentan esquivar el obstáculo. Los símbolos vacíos, en cambio, representa la situación en que los individuos "chocan" contra el obstáculo. La línea negra sin símbolos corresponde a una situación libre de obstáculos.

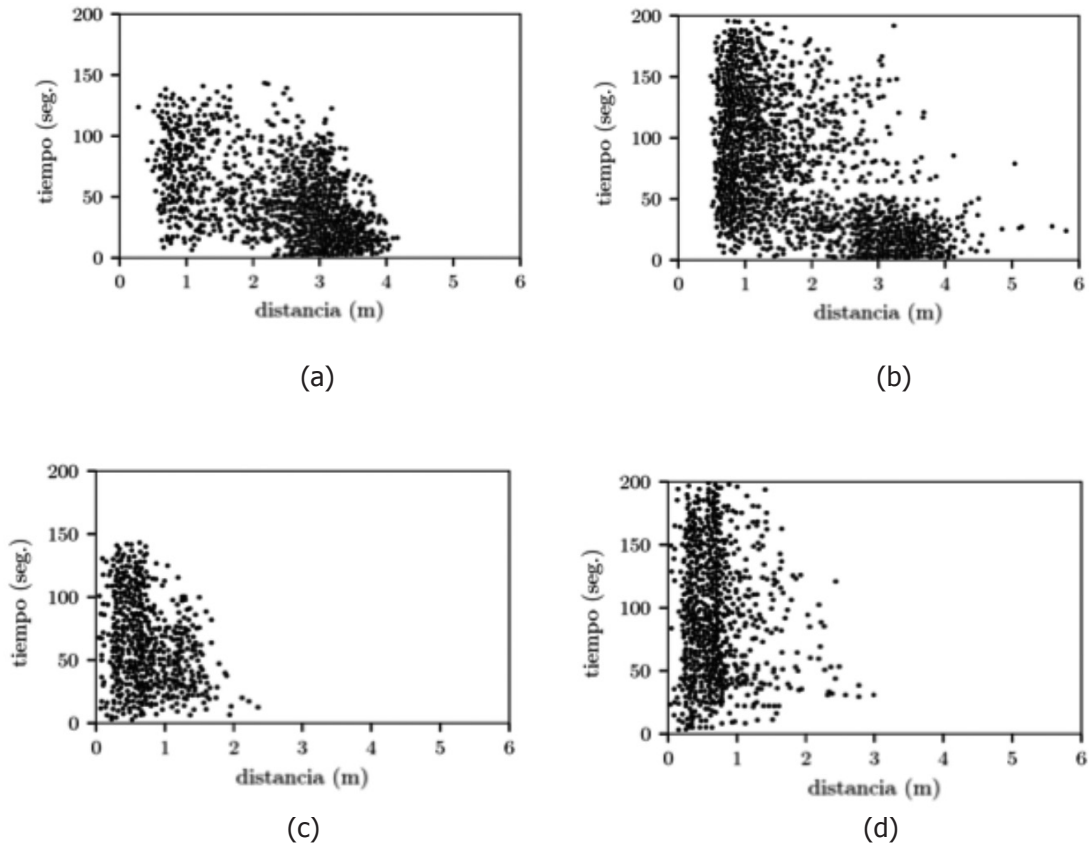


Fig. 5. Instante de tiempo en que ocurre un bloqueo (s) como función de la distancia entre esa estructura bloqueante y la salida. Cada punto corresponde a un único bloqueo. La situación corresponde a un obstáculo plano-paralelo ubicado a 1,1 L de la salida. En los gráficos superiores se representan las estructuras bloqueantes entre la pared (de la salida) y el obstáculo. En los gráficos inferiores se representan las estructuras bloqueantes entre las paredes a ambos lados de la salida.

Se observa que los patrones de los gráficos superiores (o sea, eventos obstáculo-pared) son cualitativamente diferentes para individuos sin estrategia respecto de los que estratégicamente esquivan al obstáculo.

La cantidad de eventos (o sea, puntos) en la Figura 5 es algo superior a 3650. Los bloqueos de los sin estrategia (más de 1600) ocurren a una distancia mayor que 2 m de la salida (ver Figura 5(a)). En cambio, si los individuos se comportan estratégicamente la mayoría de los bloqueos ocurren lejos de la salida en los primeros instantes (<50 s) y más cerca de ésta para instantes largos (>50 s), según se muestra en Figura 5(b). Esto indica que ocurre un desplazamiento de las estructuras bloqueantes desde los extremos del obstáculo (lejos de la salida) hacia el interior del pasillo entre éste

y las paredes del recinto (cerca de la salida). La intención de los individuos de esquivar al obstáculo termina generando una congestión o bloqueos entre el obstáculo y la pared, perjudicando la evacuación de toda la multitud. Podemos decir que, en estas circunstancias, *clever is not always better*.

El proceso de congestión o bloqueo entre el panel plano-paralelo y las paredes de la salida lo llamamos llenado del canal. A medida que transcurre el tiempo, esta región se llena cada vez de personas apuradas por salir, trasladándose los bloqueos a la zona adyacente a la salida. En las Figura 5(c) y 5(d) se observa que los bloqueos alrededor de la salida son más abundantes en el caso de individuos estratégicos respecto de aquellos sin estrategia.

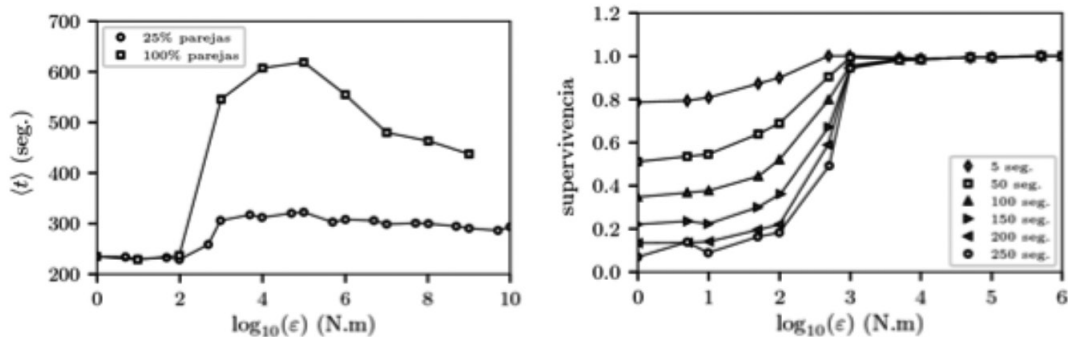


Fig. 6. (a) Tiempo de evacuación para 160 personas (medido en s) como función de la intensidad del lazo afectivo (en escala logarítmica). La curva con círculos corresponde a una población con un 25% de parejas. La curva con rectángulos corresponde a una población con 100% de parejas. (b) fracción de parejas (con distancia menor a 1,3 m entre ambos) como función de la intensidad del lazo afectivo (en escala logarítmica). Cada curva fue medida a tiempos distintos: 5 s (rombos), 50 s (rectángulos), 100 s (triángulos verticales), 150 (triángulos derechos), 200 s (triángulos izquierdos) y 250 s (círculos). La población tenía inicialmente 25% de parejas. En todos los casos la velocidad de deseo fue de 4 m/s

El llenado del canal solo es posible si el espacio obstáculo-pared admite el ingreso simultáneo de dos o más personas. Por eso, este fenómeno se registra cuando la separación obstáculo-pared es $1,1 L$ (recordar que L =diámetro de dos personas). Si esta separación es $0,866 L$ (menor al diámetro de dos personas), los bloqueos ocurren a los costados del obstáculo. Pero si la separación supera el diámetro de varios individuos, la presencia del obstáculo deja de notarse y los bloqueos ocurren exclusivamente cerca de la salida.

El modelo de (SFM) permite entender que muchas veces un obstáculo puede actuar como válvula reguladora de la cantidad de individuos capaces de avanzar hacia la salida, y por lo tanto, controla en cierto sentido el nivel de congestión cercano a la salida.

Efecto del vínculo afectivo

Estudiamos situaciones en las que los vínculos afectivos solo ocurren entre dos personas. Éstas pueden tener distinto grado de cercanía según la intensidad del vínculo. Se analizaron dos escenarios: uno con un 25% de individuos vinculados, y otro con un 100%. Se simuló la huida por pánico a través de una única salida. En la Figura 6 se muestran los tiempos de evacuación como función de la intensidad del vínculo. Se observa un incremento abrupto en los tiempos de evacuación para intensidades

entre 10^2 y 10^3 N.m. Este fenómeno es más notorio cuanto mayor es la proporción de individuos vinculados afectivamente respecto de individuos solitarios. Sin embargo, para niveles de intensidad muy altos (10^6 N.m) se registra una mejor performance en los tiempos de salida (aunque no tan buena como en los casos de intensidades casi nulas).

El incremento de los tiempos de evacuación (i.e. baja performance de evacuación) para intensidades cercanas a 10^2 N.m. no se esperaba, por lo que se estudió más exhaustivamente el comportamiento (simulado) de los individuos para este rango de intensidades. Se observaron dos patrones de conducta nítidamente distinguibles. Por un lado, se identificaron individuos con sentimientos atractivos débiles (o sea, con baja intensidad ϵ) y distancias de separación entre ellos de alrededor de 1,3 m o más. Estos tratan de huir del recinto mientras se distancian cada vez más de su contraparte. Podemos entender este comportamiento como aquel de personas con un vínculo ocasional, como amigos circunstanciales.

Por otro lado, los individuos con fuertes sentimientos entre ellos tratan de huir manteniéndose juntos. Los identificamos con aquellas personas que mantienen un vínculo familiar o de pareja. La Figura 6(a) indica que la evacuación es menos eficiente si en la multitud hay muchas personas con este tipo de vínculos (ϵ

$> 10^2$ N.m). Aparentemente, su interés por mantenerse juntos demora los tiempos de salida del conjunto. Sin embargo, para individuos con altísimo sentido de su espacio común (o sea, aquellos que están tan unidos que simulan a personas abrazadas) se observa que la performance de evacuación es algo mejor que para aquellos con $\varepsilon = 10^4$ N.m.

La Figura 6(b) resume en cierto modo los patrones de conducta observados. Cada curva en dicha figura muestra la fracción de parejas (i.e. supervivencia) que se mantienen juntas (distancias menores a 1,3 m) hasta cierto instante de tiempo, como función de la intensidad de sus sentimientos. Se representan seis instantes de tiempo desde los 5 s hasta los 250 s.

La Figura 6(b) muestra que para intensidades entre 10^2 N.m. y 10^3 N.m. se produce un cambio cualitativo importante. Por debajo de estos niveles de intensidad, los individuos se separan con el paso del tiempo. En cambio, para las intensidades mayores casi todos alcanzan la salida juntos.

Conclusiones

Los modelos físicos del movimiento de personas permiten identificar con más claridad los fenómenos involucrados durante un proceso de evacuación. Los efectos explicados en este artículo incluyen el *faster is slower*, *faster is faster*, *clever is not always better* y los relacionados con sentimientos afectivos.

Se mostró, en el contexto del modelo de (SFM), que tanto la presencia de objetos como el comportamiento de los individuos ante éstos pueden cambiar completamente el escenario de la evacuación. Los obstáculos tienden a mejorar la huida de personas de un recinto, aunque la performance final depende de su tamaño y forma. Las columnas (i.e. obstáculos circulares) parecen mostrar mejoras independientemente del comportamiento de los individuos (dentro del rango estudiado). En cambio, un panel largo puede hacer variar los efectos finales, dependiendo de su distancia a la salida y del tipo de comportamiento que sigan las personas ante su presencia. Si la multitud tiene tendencia a esquivar el panel, los tiempos de evacuación experimentarán poca mejoría. Si la multitud huye en dirección a la salida (por ejemplo, si el panel es transparente) los resultados pueden ser más alentadores.

El proceso por el cual mejora la evacuación en presencia del obstáculo es bastante complejo. La física (dentro del modelo de (SFM)) muestra que el obstáculo puede actuar como regulador de presión en el seno de la multitud. Pero esto es función, además, del tipo de comportamiento de las personas. En particular, identificamos un fenómeno paradójico (y no intuitivo) de que un comportamiento más inteligente de los individuos puede conducir a evacuaciones desastrosas.

Respecto del vínculo afectivo entre individuos, el modelo de (SFM) permitió identificar patrones de conducta diferentes para personas con una amistad circunstancial respecto de aquellas con lazos familiares y personales. Las primeras huyen sin importar si su amigo se aleja, mientras que las segundas mantienen su vínculo más tiempo. Sin embargo, este interés por preservar el espacio común (en el contexto del modelo de (SFM)) perjudica la evacuación de toda la población. Si este es el caso, es preferible que las parejas (familiares o personales) se muevan muy unidas entre sí (i.e. abrazadas) para minimizar las demoras. En este sentido, podemos asimilar a las parejas fuertemente unidas como equivalentes a un único individuo de mayor tamaño.

Agradecimientos

Los autores agradece al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Facultad Regional Buenos Aires de la Universidad Tecnológica Nacional.

Referencias

- Cheng, W.; Lo, S.; Fang, Z. y Cheng, C., (2004). Structural Survey 22, 201209.
- Frank, G. y Dorso, C.O., (2011). Room evacuation in the presence of an obstacle. *Physica A* 390 2135–2145.
- Frank, G. y Dorso, C.O., (2015). Evacuation under limited visibility. *International Journal of Modern Physics C*, 26(1):1550005.
- Frank, G. y Dorso, C. O., (2016). Panic evacuation of single pedestrians and couples *International Journal of Modern Physics C* 27(6), 1-16.
- Fruin, J., (1993). *Engineering for Crowd Safety*, Elsevier Science Publishers BV, Amsterdam, Países Bajos.
- Helbing, D.; Farkas, I. y Vicsek, T., (2000). Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407(6803):487–490.
- Henderson, L.F., (1971). The statistics of crowd fluids. *Nature*, 229:381–383.
- Hughes, R.L., (2000). The flow of large crowds of pedestrians. *Mathematics and Computers in Simulation*, 53(4):367–370.
- Okazaki, S. y Matsushita, S., (1993). A study of simulation model for pedestrian movement with evacuation and queuing. In *International Conference on Engineering for Crowd Safety*, pages 271–280.
- Parisi, D. y Dorso, C.O., (2005). Microscopic dynamics of pedestrian evacuation. *Physica A* 354 606–618.
- Parisi, D. y Dorso, C.O., (2007). Morphological and dynamical aspects of the room evacuation process. *Physica A* 385 343–355.
- Sticco, I.; Cornes, F.; Frank, G. y Dorso, C. O., (2017). Beyond the faster-is-slower effect. *Physical Rev. E* 96, 052303.