

# **BIOMECÁNICA DE MULTITUDES: CINÉTICA Y CINEMÁTICA EN LABORATORIO**

## **CROWD BIOMECHANICS:**

## **KINETICS AND KINEMATICS IN LABORATORY**

**Muñoz, Juan Carlos**<sup>1</sup>

**Toscano, Ana Paula**<sup>2</sup>

**García Piccinini, Osvaldo**<sup>3</sup>

**Represas, Gustavo**<sup>4</sup>

**Astete, Federico**<sup>5</sup>

**Pereyra Casado, Daiana**<sup>6</sup>

Muñoz, J. C., Toscano, A. P., García Piccinini, O., Represas, G., Astete, F. y Pereyra Casado, D. (2022). Biomecánica de multitudes: cinética y cinemática en laboratorio. *Revista INNOVA, Revista argentina de Ciencia y Tecnología, 10.*

## **RESUMEN**

El presente trabajo avanza en la propuesta de un nuevo campo de aplicación de la Biomecánica, que hemos denominado Biomecánica de Multitudes, Biomechanics of Crowds o Crowd Biomechanics. Aprovechando el espacio y el equipamiento del Laboratorio de Biomecánica de la Universidad Nacional de San Martín, hemos analizado el comportamiento de la Fuerza de Reacción Terrestre (FRT) sobre una multitud de personas al atravesar un espacio de igual dimensión que el ancho de una puerta y su relación complementaria con la cinemática de algunos de los integrantes de la muestra. Siendo un estudio inicial, los resultados obtenidos no son generalizables y están sujetos a corroboración mediante nuevas pruebas, pero han sido útiles para conocer algunas posibilidades y limitaciones que permitan establecer condiciones experimentales más rigurosas.

<sup>1</sup>Universidad Nacional de San Martín y Universidad Nacional de Tres de Febrero, Argentina/ profjcm@hotmail.com / ORCID iD: 0000-0002-3990-1821

<sup>2</sup> Universidad Nacional de San Martín, Argentina

<sup>3</sup> Universidad Nacional de San Martín, Argentina

<sup>4</sup> Universidad Católica de Valencia, España y Laboratorio de Biomecánica, Centro Nacional de Alto Rendimiento Deportivo

<sup>5</sup> Universidad Nacional de San Martín, Argentina

<sup>6</sup> Universidad Nacional de San Martín, Argentina

## **ABSTRACT**

Present paper continues with our proposal of a new field of application of Biomechanics, which we have called Biomechanics of Crowds or Crowd Biomechanics. Taking advantage of the space and equipment of the Biomechanics Laboratory belonging to the National University of San Martín, we have analyzed the behavior of the Ground Reaction Force (GRF) on a multitude of people crossing a simulated door, and its complementary relationship with the kinematics of some members of the sample. Being an initial study, the results obtained are not generalizable and must be corroborated by new tests, but they have been useful to know some possibilities and limitations that will allow us to establish more rigorous experimental conditions.

## **PALABRAS CLAVE**

Biomecánica de Multitudes / evacuación / cinética / cinemática.

## **KEY WORDS**

Biomechanics of crowds / evacuation / kinetics / kinematics.

## COLABORADORES

Profesoras y profesores de Educación Física, estudiantes del curso de Biomecánica (2018) de la Licenciatura en Educación Física de la Universidad Nacional de San Martín (UNSAM).

## CONTEXTO

Este artículo fue elaborado en el marco del proyecto de investigación “El laboratorio de biomecánica para el análisis de movimientos de grupos y multitudes”, incorporado en el Programa de Incentivos (UNSAM) y enmarcado en la propuesta de un nuevo campo de aplicación de la Biomecánica, que hemos denominado Biomecánica de Multitudes, Biomechanics of Crowds o Crowd Biomechanics (Muñoz et al., 2018). El experimento/simulacro de evacuación fue realizado en el Laboratorio de Biomecánica del Centro Asistencial Universitario (CAU-UNSAM).

## INTRODUCCIÓN

Hace ya unos 2500 años, Sun Tzu, el famoso general de la antigua China, expresaba en su *Arte de la Guerra* que “Maniobrar con un ejército es ventajoso; con una multitud indisciplinada, más peligroso”<sup>7</sup>. Más de dos milenios después, a propósito de la invasión de Napoleón a Rusia, en su gran obra *Guerra y Paz* (1869), la genial pluma de Leo Tolstoy escribía: “Qué multitudes! Solo mira las multitudes! ... Pierre no vio a la gente como individuos sino que vio su movimiento. Toda esta gente y caballos parecían impulsados por algún poder invisible”<sup>8</sup>.

Los abordajes psico-sociales de masas vienen siendo estudiados desde hace muchas décadas, incluso más de un siglo (Mackay, 1841; Le Bon, 1895; Strogatz, 2004). Sus aplicaciones en el cuidado de la salud y la protección de la vida se encuentran a diario, y en modo explícito en documentos oficiales que involucran medidas preventivas y modos de actuación en emergencias de índoles diversas (Vega, 2015). Desde un enfoque diferente, la aplicación de la Física y sus métodos para la investigación de fenómenos sociales se remonta, al menos, hasta el siglo XIX (Saint-Simon, 1813, 1858; Lerena Alisón, 1983, p. 205; Le Maitron, 2013). Actualmente, la Física de Multitudes es la rama de la Física cuyo propósito es describir, explicar y predecir el comportamiento mecánico de multitudes en situaciones específicas, como por ejemplo una multitud de personas pasando a través de una puerta durante la evacuación de un estadio de fútbol o durante una emergencia (Frank y Dorso; 2018) el desplazamiento humano masivo en el andén de un tren o en una marcha multitudinaria, etc. Esta disciplina considera a cada persona como si fuera una “partícula humana” y realiza modelos aprovechando el análisis estadístico, de manera análoga a cómo la teoría cinética

---

<sup>7</sup> “Maneuvering with an army is advantageous; with an undisciplined multitude, most dangerous”. (Sun Tzu, Lionel Giles (trad.), 2000, p.25). Tomamos la traducción al inglés de Lionel Giles, editada en 1910, y reeditada por Allandale Online Publishing.

<sup>8</sup> “What crowds! Just look at the crowds! ... Pierre did not see the people as individuals but saw their movement. All these people and horses seemed driven forward by some invisible power”. (Tolstoy, 1869, ed. 2001; pp. 800-801). Tomamos la traducción al inglés de la edición de Wordsworth que reimprime la traducción de Aylmer y Louise Maude, conocida como la “traducción de Maude” (1920), que recibió el “imprimatur” del propio Tolstoy. Las traducciones al castellano de las citas, expresadas en estas dos notas, responden a la interpretación propia del primer autor de este trabajo.

modela los gases a partir del análisis estadístico del movimiento de las moléculas que lo constituyen, siendo el denominado “efecto faster is slower” uno de sus logros más resonantes.

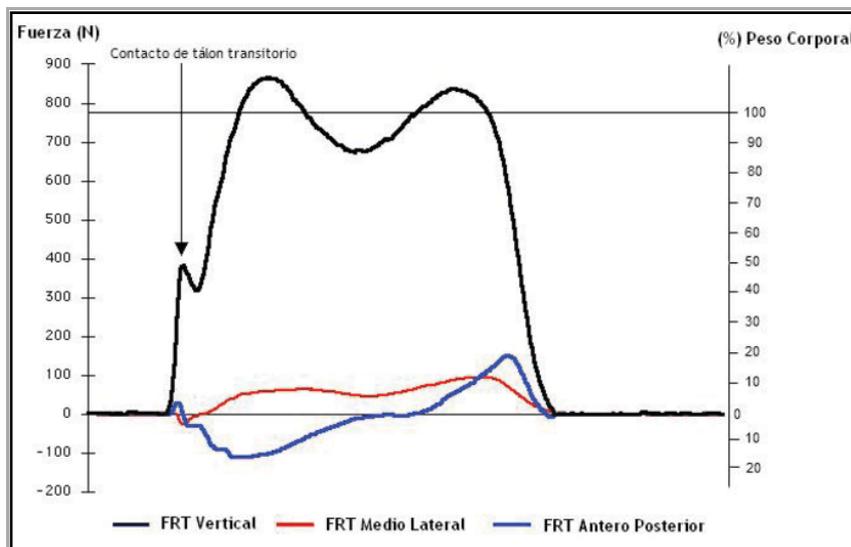
La Física de Multitudes se ocupa del estudio del movimiento, fuerzas, presiones, distancias interpersonales, que se producen durante el desplazamiento de pequeños grupos o grandes masas de personas, como por ejemplo en el caso de estampidas de multitudes en pánico (Helbing, 2007). Aunque la predictibilidad parece imposible cuando el pánico se apodera de una multitud, su comportamiento irracional no implica que sea impredecible. Incluso, podemos preguntarnos tal como lo hizo Philip Ball (2005) al referirse a las multitudes: ¿La Física nos puede ayudar simplemente a explicar y entender, o puede aplicarse para anticipar y evitar problemas? (Ball, 2005). Desde hace varias décadas, diversas investigaciones vienen mostrando que son posibles y necesarias ambas actividades científicas. Son ejemplo de ello los trabajos sobre el flujo de pasajeros en subterráneos (Hankin y Wright, 1958), tránsito pedestre (Oeding, 1963), movimiento de peatones en pasillos de shoppings (Older, 1968), aproximación multi-agente a la dinámica de peatones y multitudes cuantificada por video tracking (Helbing, 2010), el papel del pánico en procesos de evacuación de salones (Parisi y Dorso, 2006), etc. Cinemática y dinámica de multitud de peatones vienen siendo estudiados en forma creciente hace ya varios años (Claff et al., 2017), encontrándose recientemente interesantes investigaciones que también aprovechan equipamiento como el que venimos proponiendo en nuestro trabajo (Thompson, 2020).

Paralelamente, en la actualidad, la Biomecánica se ocupa del análisis de la cinemática, la cinética, la energética y la respuesta mioeléctrica de personas individuales durante su movimiento, en general considerando a cada sujeto como un sistema, que puede o no estar en interacción con otras personas, como el comportamiento de los jugadores de un equipo de hockey durante un match deportivo o de un único paciente con mielomeningocele, respectivamente.

Un fenómeno de la cinética muy estudiado por la Biomecánica es el comportamiento de la fuerza ejercida por una única persona en su desplazamiento sobre el suelo, cuya fuerza de reacción newtoniana se conoce como Fuerza de Reacción Terrestre (FRT), y que puede representarse mediante un vector en el espacio tridimensional, cuyas componentes indican el valor de esta fuerza en las direcciones vertical, anteroposterior y mediolateral, pudiendo ser medidas experimentalmente mediante el empleo de una plataforma de fuerzas (Figura 1). Durante la marcha normal, la componente vertical del vector FRT es la que alcanza la mayor intensidad, presentando una curva característica semejante a una letra W invertida. Esta fuerza se aplica en el denominado “centro de presiones” que en general no coincide con la proyección del centro de gravedad corporal sobre el suelo ni sobre la base de soporte.

La cinemática presenta en general dos tipos diferentes de abordaje biomecánico, por un lado el movimiento corporal en su conjunto, considerado como el movimiento de traslación del centro de masa corporal o de algún punto específico del cuerpo, y por otro lado, la cinemática articular, que se ocupa de los movimientos angulares de las articulaciones, en tanto movimientos anatómicos de flexión, extensión, abducción, aducción, etc. En el presente trabajo nos ocuparemos exclusivamente del primer tipo, dejando para futuros estudios la respuesta articular.

**Figura 1: Componentes de la FRT durante la marcha humana normal**



Fuente: Muñoz et al. (2012)

## OBJETIVOS

Objetivo general:

- En el presente trabajo se extiende nuestra propuesta de una Biomecánica de Multitudes, con el objetivo de llevar el análisis biomecánico a una multitud de personas que interaccionan entre sí, considerando tanto el análisis individual como también el análisis y la respuesta conjunta de la muestra.

Para alcanzar dicho objetivo general se proponen, además, los siguientes objetivos específicos:

- Asegurar la idoneidad del equipamiento para el estudio propuesto, así como también la seguridad de trabajar en rangos que los dispositivos permiten.
- Diseñar y preparar una puerta artificial (puerta experimental) dentro de un laboratorio de biomecánica, por la que atravesase un grupo amplio de personas.
- Ubicar sensores individuales en una muestra del grupo total que nos permita el seguimiento de las trayectorias, velocidades y aceleraciones a través del tiempo que dure la simulación de evacuación.
- Analizar las fuerzas de reacción terrestre sobre dos plataformas de fuerzas ubicadas debajo del marco de la puerta experimental, por la que atraviesa la multitud de personas.

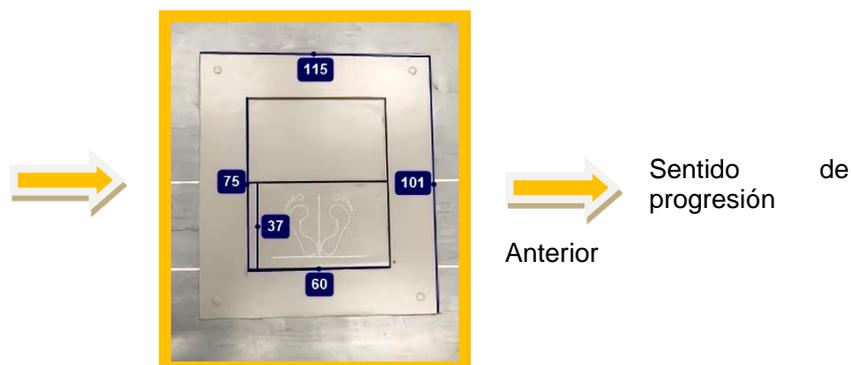
- Realizar estudios complementarios de posición del centro de presiones y gráficos fuerza-fuerza relacionando las componentes mediolateral y anteroposterior de la FRT.

En continuidad con este tipo de estudios, y entendiendo el valor de su abordaje interdisciplinario (Seitz, 2014; 2016), nos hemos propuesto aprovechar este trabajo como una manera extender el campo de aplicación de la Biomecánica para realizar nuevos aportes desde su manera particular y específica de indagar los fenómenos del movimiento humano de masas (Muñoz, 2017a), y al mismo tiempo, contribuir a la expansión de la Biomecánica y su rica y multidisciplinaria Historia, establecida hasta donde sabemos hoy, a mediados del siglo XIX con los trabajos de William Preyer y Moriz Benedikt (Muñoz, 2017b; Muñoz et al., 2021).

## METODOLOGÍA

El estudio experimental fue realizado en el Laboratorio de Biomecánica del Centro Asistencial Universitario (CAU) de la Universidad Nacional de San Martín. A tal efecto se ubicaron dos mamparas separadas una distancia de  $90 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ cm}$ , equivalente al ancho de una puerta amplia, por donde se hizo pasar al grupo. Dos plataformas de fuerza a nivel del suelo quedaron en el espacio abierto entre las mamparas, de tal forma que se ejerciera fuerza sobre ellas, en el estrecho espacio por el cual circularon las personas. Las plataformas se identifican como A y B, derecha e izquierda respectivamente, con respecto a la dirección de tránsito de la multitud entre las mamparas. Cada plataforma mide  $60 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ cm}$  en la dirección anteroposterior y  $37 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ cm}$  en la dirección mediolateral (Imagen 1).

**Imagen 1: Medidas geométricas [en cm] de las plataformas de fuerzas**



Fuente: elaboración propia.

El laboratorio tiene una dimensión de 9 metros de largo por 5 metros de ancho. La plataforma de fuerzas se encuentra instalada a nivel del suelo, aproximadamente en el centro del laboratorio. Se dispuso, además, de 10 cámaras ubicadas levemente por debajo del techo a una altura de 2,30 metros que, mediante captura de movimiento, permitieron seguir la trayectoria de los marcadores colocados en algunos sujetos de la muestra. Finalmente, el estudio se completó con análisis de video.

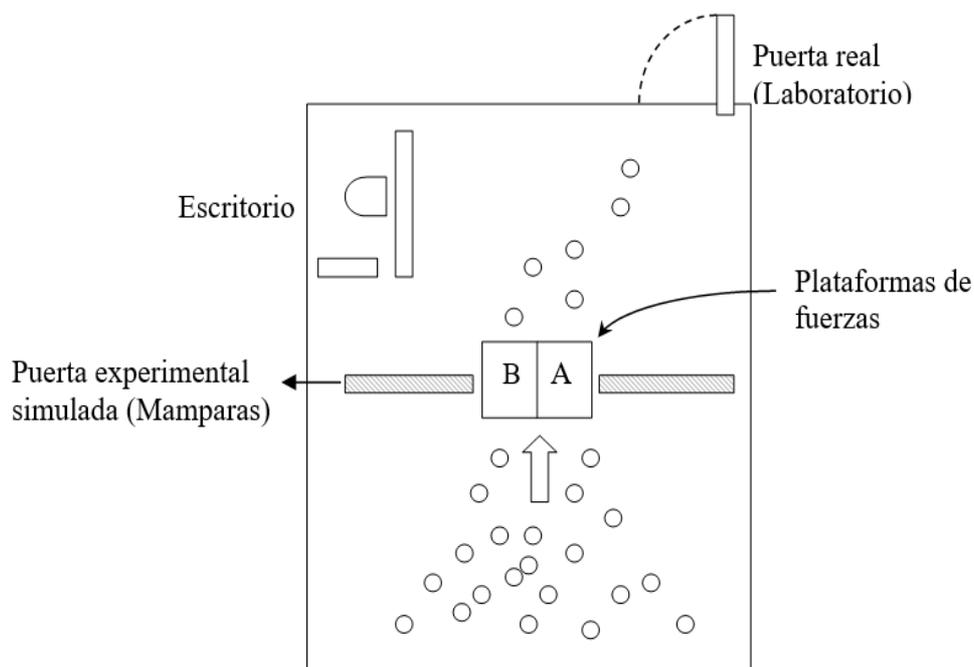
La muestra seleccionada estuvo constituida por un total de 40 profesores y profesoras de Educación Física, cursantes de la Carrera de Licenciatura en Educación Física de la UNSAM. El peso promedio de la muestra es de  $678,23 \text{ N} \pm 148,57 \text{ N}$  con un peso máximo de  $934,57 \text{ N}$  y un peso mínimo de  $452,09 \text{ N}$ .

Para los estudios de cinemática se colocaron marcadores reflectantes sobre la cabeza de 6 integrantes de la muestra elegidos aleatoriamente, de tal manera de poder seguir sus trayectorias individuales a lo largo del movimiento. Los sujetos con marcadores fueron distribuidos en distintas zonas de la masa inicial de personas, intentando respetar cierta distribución homogénea, de tal forma que no hubiera dos marcadores muy próximos entre sí.

Todos los integrantes de la muestra se ubicaron contra la pared del fondo del laboratorio, distribuidos homogéneamente. Tras la señal, todos ellos se dirigieron rápidamente hacia la “puerta experimental abierta” delimitada por las mamparas firmemente sostenidas por soportes pero no ancladas al suelo. El experimento consistió en la simulación real del desalojo de un salón atravesando el espacio libre entre ambas mamparas en el menor tiempo posible (figura 2).

De esta forma, se pudo registrar tanto la cinemática del movimiento (trayectorias, velocidades y aceleraciones) de las personas con marcadores, como también la cinética global de toda la muestra, expresada en la Fuerza de Reacción Terrestre obtenida por el paso de todos los sujetos sobre las plataformas de fuerzas, incluyendo la excursión del centro de presiones, que vincula cinética con cinemática.

**Figura 2: Representación del movimiento de la multitud en laboratorio (fuera de escala).**



Fuente: elaboración propia.

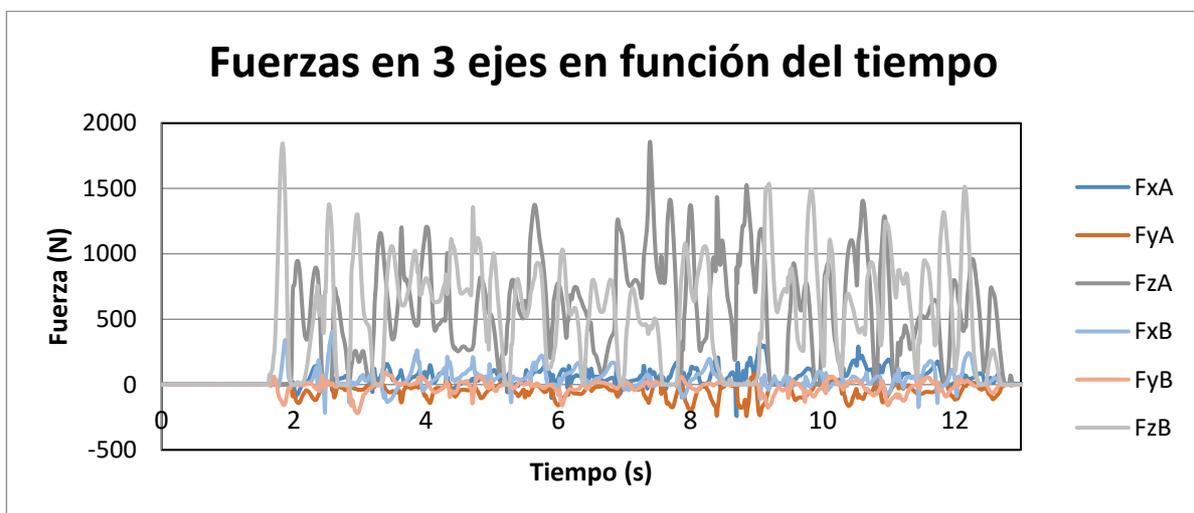
## RESULTADOS

### Fuerza de reacción terrestre

En este estudio, los valores de la FRT sobre cualquiera de las plataformas representan la fuerza de reacción newtoniana que en cada instante actúa sobre la “masa humana” total que está ejerciendo una fuerza de acción sobre la plataforma implicada. En otras palabras, es la fuerza de reacción aplicada sobre la masa conformada por la totalidad de personas que están pisando simultáneamente una plataforma en un instante determinado, de tal forma que en otro instante esta masa de personas puede ser diferente. La fuerza de reacción puede variar su valor tanto por la variación de masa humana, como por la diferencia de fuerza que cada persona ejerce en distintos instantes de su progresión, y/o por ambas razones.

Los valores de las componentes de la fuerza de reacción terrestre ejercida por las plataformas sobre los implicados durante el paso a través de “la puerta experimental” fueron registrados en un software y se representaron gráficamente sobre un mismo plano. La componente  $x$  expresa la fuerza anteroposterior, la componente  $y$  la fuerza mediolateral, mientras que la componente  $z$  la fuerza vertical (Figura 3). Por su magnitud, esta última es la más relevante.

**Figura 3: Fuerza de reacción terrestre de una multitud pasando sobre las plataformas A y B**

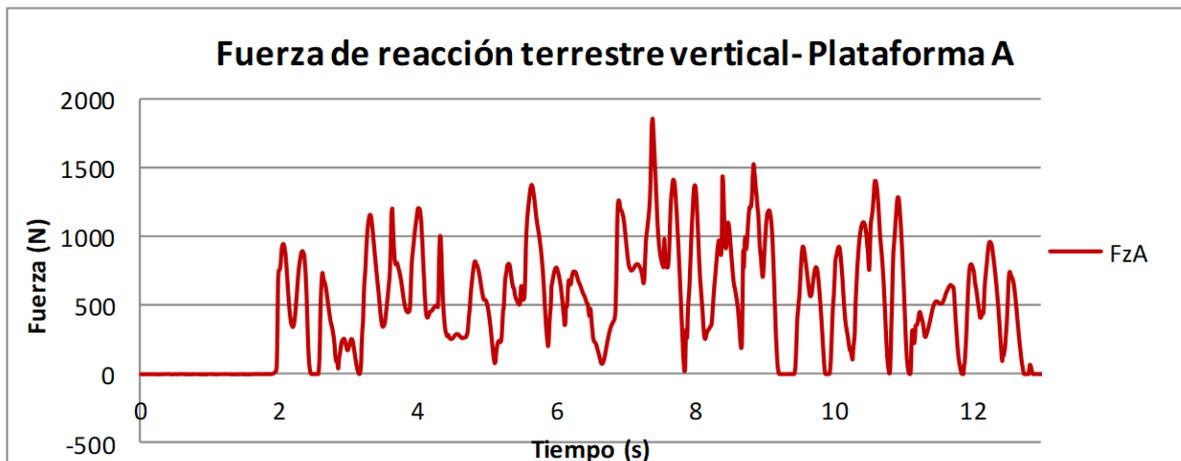


Fuente: elaboración propia.

A continuación se presentan específicamente los gráficos de la componente vertical de la fuerza en función del tiempo ( $FRT_z$  vs  $t$ ), desde el instante en el que se realiza el primer contacto con la plataforma hasta que la última persona deja de hacer contacto. Se muestran los gráficos sobre cada una de las plataformas, dándose los casos de participantes que han

apoyado sus pies sobre ambas o solamente sobre una cualquiera de ellas. La ausencia de fuerza durante los casi dos primeros segundos se debe al tiempo transcurrido entre la señal de inicio del movimiento de la masa humana y el instante en el que la primera persona hace contacto con la plataforma, luego de recorrer la distancia entre la posición donde se encontraba inicialmente (contra la pared) y la plataforma de fuerzas.

**Figura 4: Fuerza vertical de una multitud pasando sobre la plataforma A**



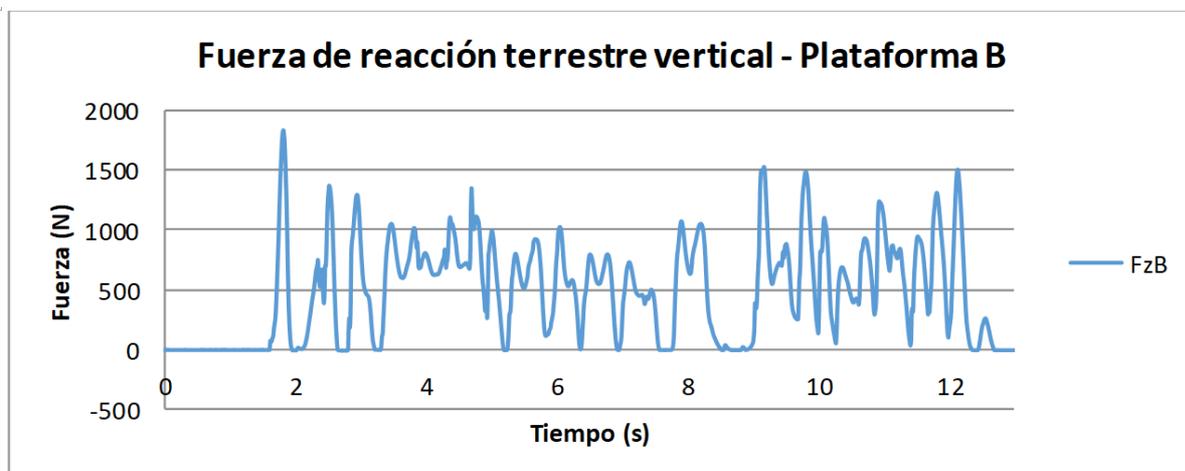
Fuente: elaboración propia.

FRT vertical media ( $Fz_{A_m}$ ) = 496,29 N

FRT vertical media sin intervalos nulos ( $Fz_{A_{m-0}}$ ) = 575,01 N

FRT vertical máxima ( $Fz_{A_{máx}}$ ) = 1858,58 N (7,39 s)

**Figura 5: Fuerza vertical de una multitud pasando sobre la plataforma B**



Fuente: elaboración propia.

FRT vertical media ( $FzB_m$ ) = 481,04 N

FRT vertical media sin intervalos nulos ( $FzB_{m-0}$ ) = 543,67 N

FRT vertical máxima ( $FzB_{m\acute{a}x}$ ) = 1844,56 N (1,83 s)

Los máximos relativos de FRTz alcanzados sobre cada plataforma son significativamente superiores a los que se obtienen durante la marcha humana normal de una persona sobre cualquiera de sus dos miembros inferiores (aproximadamente del 120 % del peso corporal). Sin embargo, no son lo suficientemente elevados como para haber atravesado la puerta experimental en carrera (salvo algún caso excepcional), en cuyo caso se esperarían picos generalmente superiores a los 1500N e incluso los 2000 N, dependiendo de la rapidez.

Sobre la plataforma B (figura 5) se observa un pico máximo inicial que indica que la primera persona (sujeto 1) en alcanzar esta plataforma lo hizo muy rápidamente comparativamente con el resto. Esto está en concordancia con la muy corta duración (0,3 s de pisada unipodal), y también con el hecho de ser la primera persona en atravesar la puerta experimental, al registrarse el primer contacto unas décimas de segundo antes que en la plataforma A. Estas inferencias son consistentes con lo que se observa en el video. Se destaca la forma de un único pico, muy diferente a la curva que se observa en una pisada en marcha normal. Este pico es originado por una pisada en carrera lenta (2,80 m/s), corroborado mediante los datos de la cinemática del sujeto 1, y a su vez por el video en el que se observa una pisada exclusiva sobre el antepié. En otras pruebas experimentales que realizamos con marcha en antepié (marcha en equino), hemos podido comprobar que la pisada en carrera lenta sobre antepié genera un único pico muy diferente a lo que sucede con la curva de marcha en esta condición.

Sobre la plataforma A (figura 5), en cambio, al inicio (1,96 s) se observa muy claramente la curva correspondiente a la fuerza de reacción terrestre sobre una persona en marcha rápida, (0,5 s de pisada unipodal), diferenciándose nítidamente la “zona de levitación” de los lóbulos de frenado y de impulsión, ambos con valores pico similares. Los valores picos de frenado y de impulsión, 945,66 N (2,06 s) y 895,57 N (2,33 s) respectivamente, son consistentes con valores de marcha rápida, y están en concordancia con lo que se observa en el video.

Recién pasado el primer segundo y medio desde el primer contacto se observa una superposición de pisadas, patrón común en ambas plataformas, que podría estar dando cuenta de un primer amontonamiento de personas en el espacio de la puerta.

Se observan pisadas individuales sobre la plataforma B (azul) en la región media del gráfico, entre los 5,19 y los 8,61 segundos, lo que estaría indicando un menor amontonamiento de personas sobre esta plataforma en este intervalo de tiempo. Desde esta interpretación nos es posible determinar que durante este lapso de tiempo se tiene 1,46 personas por segundo atravesando la puerta artificial sobre el lado izquierdo. Consecuentemente, conocido el peso medio de las personas de la muestra, nos permite estimar una masa humana media total de 345,82 kg  $\pm$  75,75 kg en este intervalo temporal, equivalente a un flujo másico humano de 100,98 kg/s  $\pm$  22,12 kg/s, atravesando dicha puerta sólo por el lado izquierdo. En cambio, sobre la plataforma A (roja) se observa, en general, una mayor concentración de pisadas

simultáneas, con cierta individualización hacia el final de la circulación de las personas a través de la puerta.

Un aspecto interesante para destacar es la forma particular de curvas individuales de FRTz en las que uno de los lóbulos se encuentra claramente disminuido con respecto al otro. Por pruebas paralelas individuales que hemos realizado, encontramos que son originadas por la pisada de una persona que apoya con talón dentro de la plataforma pero con el antepié fuera de ella, por lo que el segundo pico se ve fuertemente disminuido (casi inexistente), o por el caso de personas que pisan con el retropié fuera de la plataforma y el antepié dentro de la misma, dando por resultado una gráfica similar a la normal pero con el primer pico notoriamente disminuido con respecto al de impulsión.

### **Centro de presiones**

El centro de presiones (CP), también conocido como centro de presión, es el punto de localización del origen del vector de fuerza de reacción del suelo (FRT) sobre la planta del pie en cada instante de tiempo. Representa el promedio ponderado de la posición según los valores de fuerzas verticales registrados en diferentes celdas de carga de la plataforma de fuerzas.

El CP nos brinda información sobre el punto de aplicación del vector FRT y es totalmente independiente del centro de masa corporal (CM). Si bien en Biomecánica es habitualmente utilizado para estudios de estabilidad postural y para analizar su excursión en la huella plantar durante la marcha y carrera, en nuestro caso es aprovechado para analizar en qué regiones del suelo (en este caso de las plataformas) es descargada la fuerza ejercida por el conjunto de las personas al atravesar la puerta.

La figura 6 muestra las posiciones del CP sobre cada una de las plataformas de fuerzas ubicadas a nivel del suelo mientras las personas pasan por debajo del marco de la puerta. El eje vertical de la gráfica representa un eje anteroposterior en plano horizontal. La dirección de progresión o avance de la multitud de personas en el gráfico se entiende desde abajo hacia arriba, o lo que es lo mismo desde posterior hacia anterior, de tal forma que la región inferior indica la zona por la cual la multitud se aproxima a la puerta mientras que la región superior del gráfico expresa que ya la atravesó y se aleja de la misma. Por otra parte, el eje horizontal del gráfico representa la dirección transversal (mediolateral o laterolateral) sobre las plataformas. Este se alineó paralelamente con las mamparas que conforman el marco de la puerta y en forma perpendicular a la dirección posteroanterior de avance de las personas. La región central de la figura, entre ambos ejes verticales corresponde a la zona medial entre plataformas mientras que las regiones externas izquierda y derecha son las zonas laterales, próximas al marco a cada lado de dicha puerta.

**Figura 6: Centro de presión sobre cada plataforma.**



Fuente: elaboración propia.

La posición del CP sobre cada una de las plataformas muestra que la fuerza resultante sobre el suelo se concentra mayoritariamente en la zona más próxima y anterior al marco de la puerta experimental, mientras que se va expandiendo espacialmente a la vez que disminuyendo en densidad de puntos a medida que la multitud se aleja de esta puerta. Esto se condice con el hecho de un mayor amontonamiento de personas y de pisadas antes del ingreso, incluso podría describir el hecho de que algunas personas se impulsan y saltan desde atrás del marco, ejerciendo una mayor fuerza sobre el suelo.

Además es posible notar una mayor acumulación del CP hacia el lado de la plataforma derecha (plataforma A). Presuponemos que este amontonamiento asimétrico de puntos podría estar relacionado con el hecho de que el eje central de la puerta “real” de entrada y salida del laboratorio se ubicaba a  $4,41 \text{ m} \pm 0,05 \text{ m}$  hacia delante y  $2,00 \text{ m} \pm 0,05 \text{ m}$  hacia la derecha del eje central de la “puerta experimental”, apuntando precisamente hacia el primer cuadrante, dirección hacia la que se dirigían las personas tras pasar la puerta experimental. Por ello, en futuras mediciones será necesario controlar la dirección de salida de las personas tras pasar la puerta experimental.

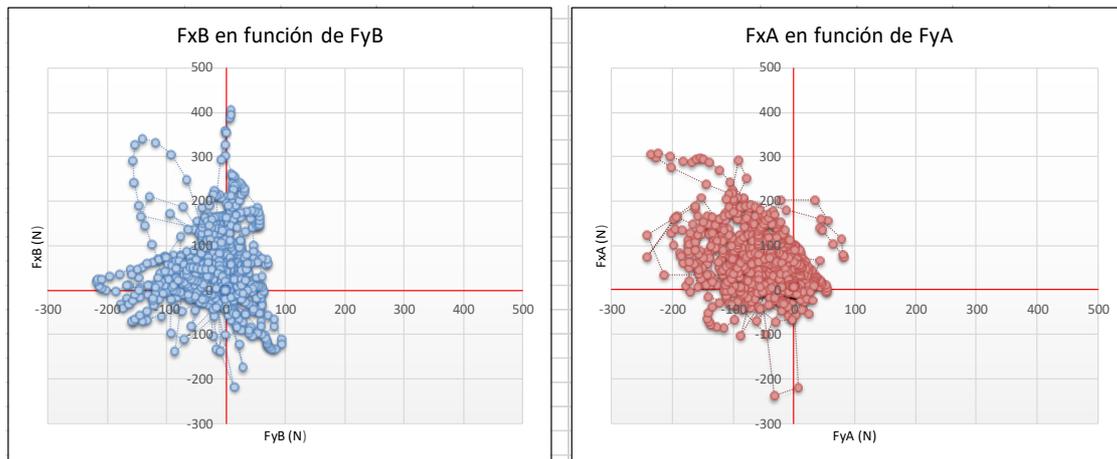
### **Gráficos FF aplicados sobre multitudes**

Los gráficos FF consisten básicamente en la representación simultánea de una componente del vector fuerza con respecto a otra mediante una curva, en nuestro caso, la componente anteroposterior de la FRT en función de la componente mediolateral (Muñoz et al., 2012, 2013). Los puntos representados nos permiten interpretar el comportamiento de la proyección de la fuerza resultante en el plano horizontal.

Debido a la disposición de los ejes de las plataformas, en este caso una componente anteroposterior positiva de la fuerza ( $FRT_x$ ) nos señala que esta fuerza sobre la multitud

apunta en su dirección de progresión hacia adelante, mientras que una componente laterolateral ( $FRT_y$ ) negativa nos indica que apunta en dirección hacia la derecha (el semieje laterolateral positivo de cada plataforma en este caso es hacia la izquierda). Así, la combinación de ambas componentes de FRT nos indica la dirección y sentido en el que apunta esta fuerza en el plano horizontal.

**Figura 7: Gráficos FF con puntos en plano horizontal sobre ambas plataformas de fuerzas**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 7 se puede observar una acumulación de puntos en sentido positivo anteroposterior y negativo laterolateral que, debido a la disposición de los ejes de coordenadas tomados para las fuerzas, en nuestro caso corresponde a una FRT ejercida en sentido anterior y hacia la derecha, en dirección a la puerta de salida del laboratorio. Interpretamos que la mayor preponderancia de la FRT hacia la derecha sobre la plataforma A (rojo) se debe a su ubicación del lado derecho, más próxima a la salida del laboratorio, mientras que en el caso de las personas actuando sobre la plataforma B (azul) se tiene una fracción de personas que tras atravesar la puerta experimental elegían inicialmente seguir en línea recta o hacia el lado contrario de la puerta del laboratorio. Es de destacar que la fuerza neta sobre la multitud es casi completamente anterior en todo instante. En otras palabras, la mayoría de las personas aplica un marcado impulso hacia el suelo y hacia atrás al atravesar la puerta experimental, que se manifiesta en la acción de la FRT en el sentido de progresión. Estas mediciones podrían estar diciendo que a su vez las personas vienen empujando a las que tienen delante de ellas con una fuerza que alcanza el orden de los 200 N a 300 N (20 kgf a 30 kgf), e incluso más. La FRT anteroposterior podría ser un indicador del valor estimativo y mínimo con el que las personas empujan a las que van por delante dado que, además, debe tomarse en cuenta la fuerza ejercida por empujones realizados con los miembros superiores sobre el torso de los demás. En futuros trabajos consideramos poner sensores de presión en el torso de algunos integrantes para corroborar o refutar esta hipótesis.

## Cinemática de multitudes

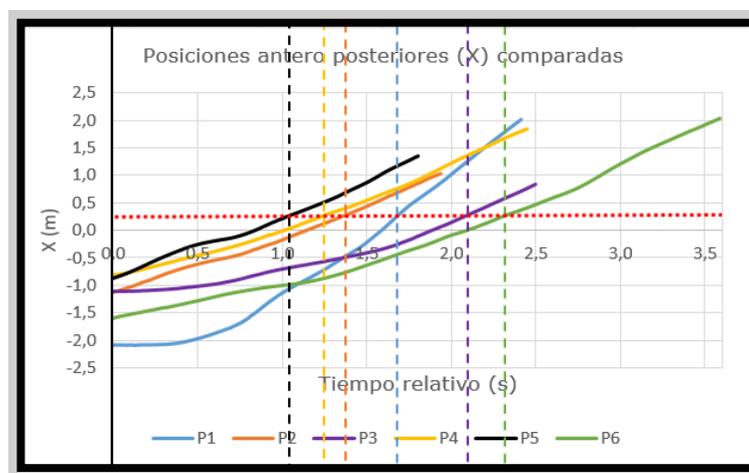
Para obtener información sobre la cinemática individual se colocó un marcador reflectante sobre las cabezas de 6 integrantes de la muestra elegidos aleatoriamente, de tal manera que pudimos seguir sus trayectorias particulares a lo largo del movimiento masivo. Como hemos dicho anteriormente, los sujetos con marcadores fueron distribuidos en distintas zonas de la masa inicial de personas, respetando cierta distribución espacial aproximadamente homogénea, de tal forma que no hubiera dos marcadores muy próximos entre sí.

Todos los integrantes de la muestra se ubicaron contra la pared del fondo del laboratorio y se dirigieron rápidamente hacia la “puerta abierta del laboratorio” pasando primero a través de la “puerta experimental”, luego de que una señal sonora indicara el inicio del movimiento.

## Análisis de desplazamientos y trayectorias

Las trayectorias de los 6 integrantes de la muestra (con marcadores) han sido descompuestas en las direcciones de desplazamiento anteroposterior (figura 8), latero-lateral (figura 9) y vertical (figura 10) para luego obtener sus gráficas en función del tiempo.

**Figura 8: Componente postero-anterior de las trayectorias en función del tiempo.**



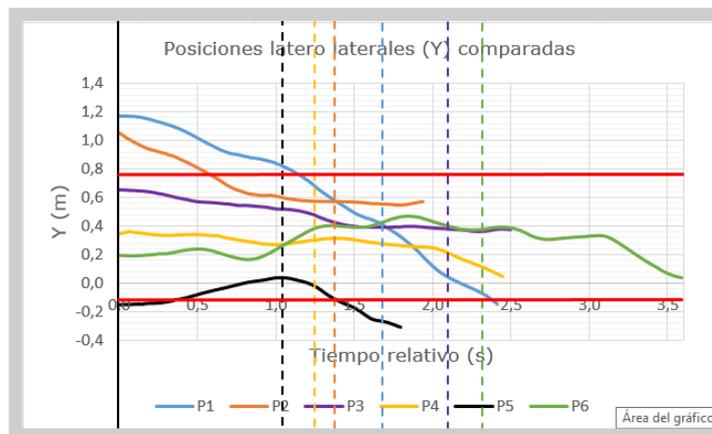
Fuente: elaboración propia.

**Desplazamiento posteroanterior:** Al analizar los gráficos de cinemática de traslación corporal debe tenerse en cuenta que los tiempos indicados son tiempos relativos, no absolutos. Con esto queremos expresar que los sujetos con marcadores no ingresan todos al mismo tiempo en el sistema de detección, es decir que cada sujeto es “captado” desde distintos instantes iniciales, y también son “perdidos” en instantes diferenciados entre sí. De esta forma, el tiempo relativo de cada persona es un “tiempo transcurrido” durante el que esta es “seguida” por el sistema de captura de movimiento. Por ello todas las curvas han sido trasladadas al mismo instante inicial ( $t = 0$ ) si bien cada persona ha comenzado a ser captada en un tiempo absoluto diferente medido por un reloj externo. Por su parte, la línea roja punteada horizontal

representa la posición de la puerta con respecto al cero de posición anteroposterior. Para cada persona, el tiempo entonces transcurrido desde  $t = 0$  hasta la línea punteada vertical indica el tiempo que le demandó llegar a la puerta experimental desde el instante en el que la cámara tomó su posición, por lo tanto, no debe entenderse que las personas de la muestra alcanzaron esta puerta en orden secuencial de curvas leídas de izquierda a derecha. De hecho, se observa en el análisis de video que la primera persona en llegar y atravesarla es P1 (azul) y no P5 (negro). Precisamente, el haber llegado antes que el resto es lo que le permitió a P1 tener una velocidad anteroposterior claramente superior al resto del grupo, logrando pasar sin verse afectada por la multitud. Obsérvese la similitud de las pendientes de las curvas de posición en función del tiempo a excepción de la azul, expresión de la mayor rapidez (mayor pendiente) en la dirección posteroanterior de esta última con respecto al resto. La similitud de estas pendientes nos está dando una estimación de la velocidad media con la que las personas atraviesan la puerta de  $1,08 \text{ m/s} \pm 0,19 \text{ m/s}$ , valor aproximadamente un 20 % inferior al de la velocidad media de marcha humana normal.

**Desplazamiento laterolateral:** Analizando los desplazamientos laterolaterales en función del tiempo es posible ver el movimiento lateral de las personas, perpendicular a la línea de avance. Las líneas rectas horizontales de color rojo representan el ancho de la puerta experimental y permiten distinguir los acercamientos/apartamientos individuales con respecto a ella, antes, durante (líneas punteadas verticales) y posteriormente a cruzarla.

**Figura 9: componente latero-lateral de las trayectorias en función del tiempo.**



Fuente: elaboración propia.

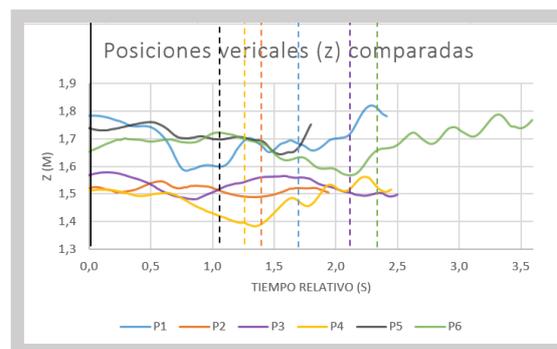
Recordando que P1 (azul) es quien primero llega y traspasa la puerta experimental, se puede entender que haya podido cruzarla lateralmente sin alterar su movimiento, siendo la única persona que pudo realizar este movimiento de ingreso por la izquierda y salida hacia la derecha en las proximidades de la puerta experimental, o viceversa. La pendiente de esta curva nos muestra, además, una relativamente alta velocidad laterolateral que logra mantener aproximadamente constante durante gran parte de su movimiento. Las curvas trazadas nos permiten distinguir que el resto de los integrantes con sensores han mantenido un desplazamiento laterolateral con muy poca variación hacia los costados en las proximidades de esta puerta, mostrando una casi imposibilidad de desviación una vez ingresado al flujo de la multitud. Se evidencia así una dificultad de las personas para

implementar estrategias propias cuando ya están inmersos en el flujo masivo. Sin embargo, es de destacar que P5 (negro) pareciera poder disponer de cierta posibilidad de movimiento estratégico, acercándose directamente y de frente al marco derecho de la puerta (línea inferior), luego moviéndose unos 20 cm hacia el eje central de la puerta para atravesarla “pegado” a este marco y casi instantáneamente apartándose hacia el lado externo una vez atravesada, separándose rápidamente del flujo saliente.

**Trayectorias:** De esta manera, entendemos que el uso de sensores individuales para el análisis cinemático permite -al menos parcial y someramente- el intento de interpretar las diferentes alternativas, posibilidades de elección, grados de libertad de movimiento, elecciones y decisiones tomadas por las personas para describir sus propias trayectorias. Específicamente, en nuestro caso pareciera que algunas personas responden más a decisiones personales mientras que otras sólo se mueven según lo hace la multitud como un todo. En resumen, entre quienes parecieran haber elegido sus estrategias encontramos dos casos interesantes: mientras que la primera persona en atravesar la puerta (azul) lo hizo aventajando al resto y manteniendo una trayectoria aproximadamente recta y a alta velocidad, otra persona (negro) lo hizo siguiendo una trayectoria en forma aproximadamente parabólica, ingresando desde una posición lateral a la puerta muy pronunciada, pasando por dentro de la puerta de forma muy pegada a su marco más próximo (máximo de la parábola) y finalmente saliendo otra vez hacia el mismo lateral con una trayectoria de marcada curvatura, como seleccionado el camino a seguir y escabulléndose entre la multitud pero con un plan predeterminado, no necesariamente establecido desde el principio del movimiento. Hasta qué punto y bajo qué condiciones es posible la elección de una determinada trayectoria, al menos parcialmente, es un tema interesante para posibles investigaciones a futuro. El resto de los integrantes de la muestra con marcadores, en cambio, parecen haber seguido menos selectivamente una estrategia, viéndose que en todos estos casos han atravesado la puerta por la zona central, con la limitación de tener personas constantemente por ambos lados, por delante y por detrás de estos integrantes en cuestión.

**Desplazamiento vertical:** Finalmente ocupémonos de analizar qué sucede sobre el eje vertical del movimiento. En el gráfico podemos observar que los sensores registraron variaciones en la altura próximas e incluso superiores a los 20 cm (azul, verde y amarillo), mientras que en otros casos rondan los 10 cm (naranja, negro, violeta).

**Figura 10: componente vertical de las trayectorias en función del tiempo.**



Fuente: elaboración propia.

Lo común en estos casos es que todos ellos alcanzan la puerta experimental con el sensor indicando alturas menores, a lo sumo similares (verde), que las que traían cuando fueron inicialmente captados por el dispositivo algunos metros previos al ingreso. En algunos casos (azul y amarillo) la altura con la que atraviesan la puerta es incluso manifiestamente menor que sus propias tallas. Se observa en varios casos que, además, la altura del sensor crece rápidamente una vez atravesada la puerta, alcanzando una altura mayor que la del trayecto previo, lo que concuerda con uno o varios pequeños saltos luego de pasar el marco.

Intentemos algunas explicaciones posibles, a modo de hipótesis, teniendo en cuenta que las variaciones de altura observadas no necesariamente responden a iguales variaciones en la altura del centro de masa corporal (CMC). Dado que los sensores fueron ubicados sobre las cabezas, de tal forma de evitar pérdidas discontinuas de la señal, la variación de la posición registrada en el eje vertical podría responder a una combinación de movimientos de flexoextensión de las articulaciones del cuello, columna, caderas, rodillas y/o tobillos. Considerando que en marcha humana normal la máxima diferencia de altura entre las fases de apoyo y balanceo es solamente de unos 4 cm (media de  $3,2 \text{ cm} \pm 0,8 \text{ cm}$ ) (Perry, Burnfield, 2010, p.41), es claro que esta forma de locomoción no explica por sí sola la variación observada en el experimento. En otras palabras, durante el movimiento multitudinario en las proximidades de la puerta experimental se producen otro u otros fenómenos que aumentan la amplitud del movimiento en la dirección superoinferior. Estimando una variación empírica máxima de unos 7 cm entre la altura de la cabeza en posición anatómica (neutra) y su máxima flexión, cualquier variación de la altura mayor que este valor por sobre los normales de marcha implican necesariamente un involucramiento de otras articulaciones así como plausibles cambios en los tipos de movimientos más allá de la marcha, que en este caso es claramente no normal.

La disminución de altura con la que varios integrantes llegan a la puerta podría deberse a una inclinación del tronco, que a su vez sería consecuencia de empujones o de una predisposición para dar un paso inicial de carrera o salto, situaciones ambas observadas en los videos. Vale la pena aclarar que, según los registros de video obtenidos, mientras se observa una casi imposibilidad de flexionar apreciablemente el tronco cuando se está inmerso en la multitud, una vez alcanzado el marco los empujones tienden a flexionar el tronco de las personas que van saliendo por delante, siendo empujones no equilibrados por delante ante el aumento de distancia entre personas que ya lograron “escapar”. Cámaras a nivel del suelo/rodillas y a 1,65 - 1,70 m de altura, aproximadamente la altura promedio de los sensores sobre las cabezas, podrían ser útiles para analizar estos posibles movimientos y acciones en un entorno de la puerta experimental. Asimismo, para identificar posibles causas de estos movimientos y determinar si estos comportamientos tienen alguna regularidad en distintas muestras, dependiendo de la cantidad de personas, densidad, velocidad de flujo, entre otras variables, consideramos necesario realizar estudios de goniometría, cinemática articular e incluso mioeléctricos sobre el comportamiento muscular.

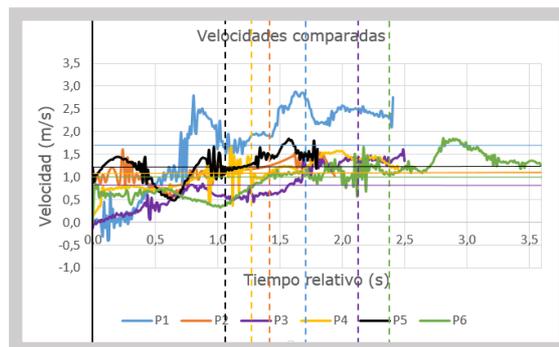
Un caso particular es P5 (negro), de quien ya hemos hablado anteriormente: esta persona ha pasado pegada al marco de la puerta, ingresando y apartándose rápidamente del mismo. En su movimiento, que en todo momento pareciera responder a un comportamiento estratégico, al salir del marco se agacha escabulléndose y una vez corrida del resto del flujo

de personas saliente, entonces en ese momento se yergue dando un pequeño saltito y seguidamente se interrumpe la señal. Recién hoy, a la luz de estos resultados comprendemos lo importante que resultaría preguntar a los involucrados sobre posibles estrategias, sensaciones, imposibilidades experimentadas durante el simulacro, para lo cual también se nos hace más clara la necesidad de interactuar con profesionales del área de la Psicología, tanto antes, durante y posteriormente al simulacro de evacuación.

### Análisis de velocidades

El laboratorio de Biomecánica nos permite seguir con facilidad la velocidad instantánea de los integrantes de la muestra con sensores, de tal manera de ver sus variaciones en todo momento durante la aproximación, el traspaso y la salida de la puerta artificial (figura 11). Si bien puede tener cierto valor como indicador estimativo, la velocidad media de cada persona en el trayecto completo no es el factor más relevante en el estudio, dado que tanto la velocidad muy anterior a la puerta experimental como su marcado incremento una vez atravesada dan lugar a velocidades medias que no se condicen con la velocidad del flujo durante el aglutinamiento.

**Figura 11: Velocidades en función del tiempo. Las rectas horizontales expresan la velocidad media posteroanterior de los 6 integrantes con sensores.**



Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, la velocidad media calculada en determinados tramos anteriores a la puerta y durante el traspaso nos puede reflejar la relación particular con la velocidad del flujo masivo. En nuestro caso se tiene que, exceptuando el sujeto 1 quien es el primero en atravesar la puerta tras una corrida inicial, la velocidad media ( $v_m$ ) de las personas con marcadores es inferior a la velocidad media de adultos en marcha normal, cuyos valores son de 1,43 m/s (varones) y 1,28 m/s (mujeres), a su vez con una media global de 1.36 m/s.

Un valor cinemático que consideramos de mayor interés es la velocidad con la que cada persona atraviesa la puerta experimental ( $v_p$ ), siendo que los valores registrados de rapidez tampoco superan la media de marcha normal, exceptuando nuevamente el sujeto 1 que lo hace con una rapidez de 2,80 m/s, levemente inferior a la rapidez máxima absoluta alcanzada (2,90 m/s) tras su corrida (Tabla 1).

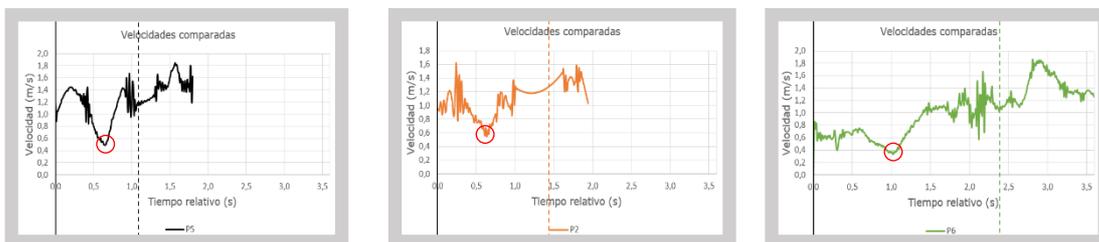
**Tabla 1: Velocidades medias posteroanteriores, medias, máximas y en puerta. Todas las velocidades máximas se alcanzaron posteriormente al traspaso de la puerta.**

N	$v_{xm}$ [m/s]	$v_m$ [m/s]	$v_{m\acute{a}x}$ [m/s]	$v_p$ [m/s]
1	$1,70 \pm 0,89$	$1,79 \pm 0,90$	2,90	2,80
2	$1,10 \pm 0,24$	$1,14 \pm 0,24$	1,60	1,20
3	$0,76 \pm 0,45$	$0,77 \pm 0,45$	1,60	1,30
4	$1,04 \pm 0,32$	$1,05 \pm 0,32$	1,70	0,80
5	$1,22 \pm 0,32$	$1,22 \pm 0,32$	1,80	1,10
6	$1,00 \pm 0,39$	$1,00 \pm 0,39$	1,90	1,00

Fuente: elaboración propia.

Un aspecto que resulta interesante al analizar individualmente el módulo de la velocidad en función del tiempo consiste en la aparición de un claro mínimo en las gráficas (figura 12). Este mínimo de velocidad se produjo mayoritariamente entre medio segundo y un segundo previo al alcance la puerta experimental.

**Figura 12: Ejemplos de mínimo de velocidad previo a la puerta.**



Fuente: elaboración propia.

Interpretamos que este mínimo se produce en el instante en el que la persona con el sensor alcanza a la masa de personas ya amontonadas y comprimida (con cierto control voluntario), produciéndose un marcado descenso de la velocidad personal (Tabla 2). Los valores de velocidad registrados en cada mínimo previo a la puerta experimental resultan ser del orden del 50 % al 70 % inferiores que los respectivos valores de velocidad al llegar a dicha puerta, apenas del orden de un segundo después. Sin embargo, entendemos que en una situación real de pánico (situación no controlada) sí podría aumentar aún más la compresión con el consiguiente peligro para la salud y la posibilidad de pérdida de vidas. Por el momento sólo podemos proponer hipótesis. Suponemos que este mínimo podría depender de diversos factores, entre ellos la cantidad de personas aglutinadas previo a la puerta experimental, que a su vez determinaría la distancia a dicha puerta en el momento del frenado, también alguna relación entre la velocidad del flujo y el ancho de la puerta, a tal punto que tal vez podría haber una secuencia de mínimos, no existir un mínimo tan marcado o darse un amesetamiento.

**Tabla 2: Porcentaje de velocidad en el mínimo relativo ( $v_{\text{mín}}$ ) con respecto a la velocidad en puerta ( $v_p$ ). El signo negativo indica que  $v_{\text{mín}}$  está por debajo de  $v_p$ . No se considera P1.**

N	$\Delta t_{p-\text{mín}}$ [s]	$v_{\text{mín}}$ [m/s]	$\Delta v_{\text{mín}-p}$ [m/s]	% $\Delta v_{\text{mín}-p}$
1	---	---	---	---
2	0,8	0,5	- 0,7	- 58
3	0,8	0,4	- 0,9	- 69
4	0,8	0,7	- 0,1	-12
5	0,5	0,5	- 0,6	- 55
6	1,4	0,3	- 0,7	- 70

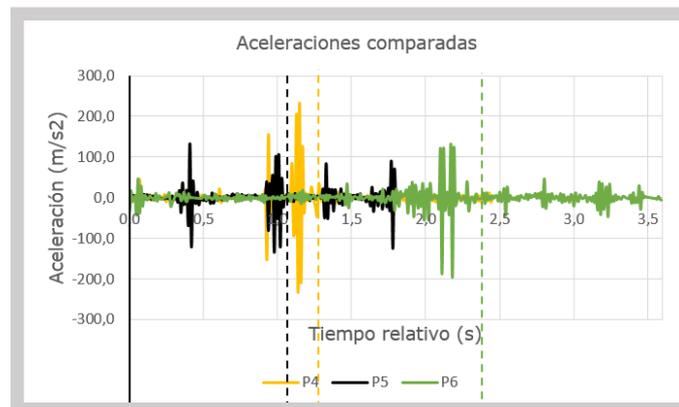
Fuente: elaboración propia.

Con sensores en todas las personas consideramos que podríamos determinar la velocidad de cada subgrupo dentro de la multitud general, por lo que podría disponerse de tres tipos de información cinemática: velocidad de cada persona, velocidad del subgrupo (cluster), velocidad del flujo, para comparar con los modelos propuestos por la Física de Multitudes.

### Aceleraciones

El análisis de las aceleraciones nos muestra mayoritariamente la existencia de picos muy intensos de aceleración unos instantes antes de alcanzar la puerta experimental. En la figura 13 hemos dejado sólo algunos casos para mostrar con claridad este fenómeno que describimos.

**Figura 13: algunas aceleraciones en función del tiempo.**



Fuente: elaboración propia.

Las aceleraciones medidas en este experimento muestran picos con valores absolutos entre 100 y 200  $m/s^2$  y variaciones que presentan una duración del orden de los 0,2 segundos. Dadas las condiciones en las que hemos realizado este experimento, no nos es posible determinar cuál es la influencia del movimiento de la cabeza y del CMC sobre estos picos. En

futuros experimentos será necesario considerar la posibilidad de ubicar los sensores en otras regiones corporales.

## **DISCUSIÓN**

La Física de Multitudes considera cada ser humano como una “partícula humana” dentro de un “fluido humano” en analogía con el comportamiento de un fluido, y por lo tanto se centra en el comportamiento estadístico de estas partículas. Nosotros consideramos que, además, a diferencia de los fluidos es posible y relevante estudiar el comportamiento mecánico de cada partícula humana, en particular de su cinemática articular y su funcionamiento muscular, que tenemos pensado como continuación del presente trabajo. A su vez, también es cierto que el estudio individual conlleva la búsqueda de patrones comunes que puedan aportar información sobre el comportamiento general.

Entre las potencialidades de este tipo de estudio destaca la posibilidad de englobar “en un todo” los análisis cinemático corporales y articulares, dinámicos, musculares y funcionales. Además es experimental, y como tal puede ser valioso para producir y corroborar/refutar modelos teóricos y simulaciones computacionales. Esto también puede aportar en cuanto a la existencia de grados de libertad de movimientos y la posibilidad de elección de estrategias en cada instante y/o posición con respecto al flujo y a la ubicación de la puerta experimental.

A diferencia de las consideraciones generalmente tomadas en Física de Multitudes, las personas no son partículas de fluido moviéndose exclusivamente bajo leyes mecánicas. Al contrario, las personas tienen poder de establecer estrategias, de cambiarlas de un momento al otro, y también poder de decisión. En qué grado las personas, “inmersas” en la corriente humana, pueden desarrollar estas posibilidades es un interesante y desafiante aspecto a analizar. Consideramos que estas aplicaciones de la Biomecánica, que muy bien podrían integrarse con las de la Física de Multitudes, pueden brindar alguna perspectiva de esta situación. El trabajo conjunto con profesionales de la Psicología aparece en este punto como fundamental, pudiendo realizar aportes muy valiosos que se integren con los mecánicos.

### **Limitaciones del presente estudio**

Entre las limitaciones del trabajo podemos mencionar las siguientes:

- Las dimensiones reducidas de nuestro laboratorio para realizar la prueba, lo cual imposibilita trabajar con grandes multitudes.
- La muestra elegida es pequeña, y su relación con el ancho de la “puerta” es insuficiente para lograr un aglutinamiento que ralentice notoriamente el paso.
- La cantidad de sujetos con marcadores resultó insuficiente.
- No se dispuso previamente de cámaras laterales a nivel del suelo en el espacio de la puerta.
- Reducida área de cobertura de los sensores de captura del movimiento, por lo que el tiempo de seguimiento previo a la puerta experimental resultó breve.

- La “puerta” delimitada por mamparas no es lo suficientemente rígida como para soportar fuertes golpes o choques contra la misma, como lo serían dos paredes en un caso real. Esto podría estar alterando el comportamiento de las personas al acercarse a las mamparas.
- Evacuación poco realista ante una emergencia o situación de pánico generalizada. Los resultados obtenidos sí puede tener mayor valor en el caso de multitudes que se desplazan con cierto orden al pasar por un pasillo más estrecho, como podría ser el caso de acceder multitudinariamente a calles más angostas o a pasillos más angostos del tren subterráneo (metro).

El trabajo de laboratorio es una limitación intrínseca de este tipo de investigaciones, siendo el espacio físico una de los más importantes limitantes. Consideramos que la realización de estudios similares en espacios más amplios (gimnasios, galpones, estadios cubiertos) permitirá obtener resultados más confiables. A tal efecto, será fundamental la instalación y uso de equipamiento específico de Biomecánica (plataformas de fuerzas, baropodómetros, goniómetros digitales, marcadores articulares, sensores mioeléctricos, etc) fuera del laboratorio, incluso en andenes de trenes, subterráneos, calles y esquinas altamente transitadas, estadios abiertos, etc.

## CONCLUSIONES

El experimento realizado cumple con las expectativas propuestas como trabajo preliminar, y nos permite vislumbrar un gran número de posibilidades. Entendemos que posteriores trabajos permitirán obtener valores más rigurosos y gráficas relacionales más variadas.

Habiendo seguido la trayectoria de un subgrupo de individuos de la muestra, en este momento estamos trabajando en mejoras de las condiciones experimentales, por ejemplo la estabilidad de “la puerta”, que nos permitan realizar estudios más precisos.

El propósito de este trabajo preliminar no debe entenderse tanto desde los resultados obtenidos, que son limitados y sujetos a corroboración mediante nuevas pruebas, sino más bien como una nueva posibilidad que se abre en el campo de la Biomecánica, en su relación con la Física de Multitudes y otras ciencias involucradas en el análisis de este tipo de fenómenos. La Biomecánica de Multitudes podría también aplicarse al comportamiento de masas de animales, como podrían ser las estampidas de manadas.

Si bien nuestro laboratorio tiene dimensiones muy reducidas, consideramos que los resultados obtenidos avalan la propuesta del empleo simultáneo de diversos dispositivos del laboratorio de Biomecánica para el estudio experimental del movimiento de multitudes. Sin duda pueden hacerse pruebas en laboratorios de Biomecánica de mayores dimensiones y fundamentalmente puede transportarse equipamiento del laboratorio y realizar estudios futuros en grandes espacios como gimnasios o estadios. De todas maneras, esto no implica dejar de analizar el comportamiento de grupos numerosos en laboratorios con espacios reducidos.

Este trabajo debe entenderse como un puntapié inicial, un primer intento de acercamiento de las posibilidades que podría brindar el laboratorio de biomecánica para el análisis del

movimiento, dinámica y respuesta articular de multitudes. La integración con la Fisiología también puede aportar otros puntos de vista sobre la respuesta energética, mientras que la Psicología, como hemos expuesto, abordajes desde el comportamiento y las experiencias personales.

Sin duda estamos convencidos del aporte que la Biomecánica y el laboratorio de Biomecánica pueden brindar a la comprensión de los fenómenos que involucran movimientos de grupos y masas humanas. Queda abierta la propuesta a otros investigadores en Biomecánica que se interesen por incursionar en fenómenos que involucran multitudes en grandes y pequeños grupos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ball, P. (2014). *Critical Mass. How one thing leads to another*. Random House.

Claff, D., Williams, M. S. & Blakeborough, A. (2017). The kinematics and kinetics of pedestrians on a laterally swaying footbridge. *Journal of Sound and Vibration*, 407, 286-308.

Frank, G. A. y Dorso, C. O. (2018). La física detrás de la evacuación de personas. *Proyecciones*, 16(2).

<https://ria.utn.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12272/5601/Proyecciones%20octubre%202018%20FRANK.pdf?sequence=1>

Giles, L. (trad.). (2000). *Sun Tzu on the Art of War*. Allandale Online Publishing.

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a8/The\\_Art\\_of\\_War\\_%28Giles%2C\\_1910%29.pdf](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a8/The_Art_of_War_%28Giles%2C_1910%29.pdf)

Guío Burgos, F. A. (2010). Flujos peatonales en infraestructuras continuas: marco conceptual y modelos representativos. *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*, 29, 1-25.

<https://www.redalyc.org/pdf/1942/194214466011.pdf>

Hankin, B. D. & Wright, R. A. (1958). Passenger Flow in Subways. *Journal of the Operational Research Society*, 9(2), 81-88,

Helbing, D; Johansson & A; Al-Abideen, H. E. (2007). Crowd turbulence: the physics of crowd disasters. *The Fifth International Conference on Nonlinear Mechanics*.

<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0708/0708.3339.pdf>

Helbing, D. & Johansson, A. (2010). Pedestrian, Crowd, and Evacuation Dynamics. *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, 16, 6476-6495.

Le Bon, G. (1895). *Psychologie des foules*. Félix Alcan.

[https://electrodes.files.wordpress.com/2008/12/psychologie\\_des\\_foules\\_gustave\\_lebon\\_le\\_bon\\_gallica\\_ed\\_1895.pdf](https://electrodes.files.wordpress.com/2008/12/psychologie_des_foules_gustave_lebon_le_bon_gallica_ed_1895.pdf)

Le Maitron. (2013). Notice SAINT-SIMON Claude, Henri. (Claude-Henri de Rouvroy, comte de Saint-Simon). En: *Dictionnaire biographique*. Mouvement ouvrier, mouvement sociale. Dernière modification le 18 décembre 2013.

<https://maitron.fr/spip.php?article24357>

Lerena Alesón, C. (1983). *Reprimir y liberar*. Vol. 58. AKAL.

[https://books.google.com.ar/books?id=1CUGgxxfzWAC&pg=PA205&dq=saint+simon+Memorias+sobre+la+ciencia+del+hombre&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwj\\_mZK-tbz6AhXWuJUCHWdkDdwQ6AF6BAGCEAI#v=onepage&q=saint%20simon%20Memorias%20sobre%20la%20ciencia%20del%20hombre&f=false](https://books.google.com.ar/books?id=1CUGgxxfzWAC&pg=PA205&dq=saint+simon+Memorias+sobre+la+ciencia+del+hombre&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwj_mZK-tbz6AhXWuJUCHWdkDdwQ6AF6BAGCEAI#v=onepage&q=saint%20simon%20Memorias%20sobre%20la%20ciencia%20del%20hombre&f=false)

Mackay, C. (1841). *Extraordinary Popular Delusions and the Madness of Crowds*. Richard Bentley.

<https://books.google.com.ar/books?id=ufoLAAAAYAAJ&printsec=frontcover&dq=Mackay,+Charles+1841&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwj0iO3F3q76AhXJppUCHfHfCz0Q6AF6BAGFEAI#v=onepage&q=Mackay%2C%20Charles%201841&f=false>

Muñoz, J. C; Represas, G; Vales Flores, M. & Cassibba, R. (2012). FF graphs and ground reaction force. *ASB Abstracts of the 36th annual meeting of the American Society of Biomechanics*, 693-695.

[http://www.asbweb.org/conferences/2012/topics/ASBAbstracts\\_final.pdf](http://www.asbweb.org/conferences/2012/topics/ASBAbstracts_final.pdf)

Muñoz, J. C; Vales Flores, M; Cassibba, R. y Represas, G. Gráficos FF y FA: Método complementario de análisis cinético. *Anales AFA*, 24(1), 51-55, 2013.

<http://anales.fisica.org.ar/journal/index.php/analesafa/article/view/1863/1881>

Muñoz, J. C. (2017a). Biomecánica de Multitudes. *Libro de resúmenes de la 102° Reunión Anual de la Asociación Física Argentina*. AFA.

Muñoz, J. C. (2017b). El pensamiento biomecánico de Moriz Benedikt: aportes al desarrollo de la biomecánica. *Anales de la Sociedad Científica Argentina*, 259(3), 57-70.

Muñoz, J. C., Represas, G., Toscano, A.P., García Piccinini, O. & Miyano, B. (2018). Crowd Biomechanics and ground reaction force. *Ijarset*, 5(6), 6252-6256.

<http://www.ijarset.com/upload/2018/june/35-IJARSET-JUAN.pdf>

Muñoz, J. C., Montané, F. M. & Vales Flores, M. M. (2021). Biomechanics: origin of the concept and the science of movement. Abstracts book. Biomechanics 2020. *International Conference of the Polish Society of Biomechanics* (Online).

[https://biomechanics2020.wum.edu.pl/sites/biomechanics2020.wum.edu.pl/files/b2020\\_abstract\\_book\\_08092\\_021\\_21.pdf](https://biomechanics2020.wum.edu.pl/sites/biomechanics2020.wum.edu.pl/files/b2020_abstract_book_08092_021_21.pdf)

Oeding, D. (1963). Oeding, D., 1963. Verkehrsbelastung und Dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fussgängerverkehrs. Dissertation. Technische Hochschule Carolo Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig.

Older, S. J. (1968). Movement of pedestrians on footways in shopping streets. *Traffic Engineering & Control*, 10, 160–163.

Parisi, D. R. & Dorso, C. O. (2006). The role of panic in the room evacuation process. *International Journal of Modern Physics*, 17(03), 419-434.

Perry, J. & Burnfield, J. M. (2010). *Gait Analysis*. Slack.

Saint-Simon, H. (1813). *Mémoire sur la Science de l'Homme*.

Saint-Simon, H. (1813). Travail sur la gravitation universelle, avec dédicace l'Empereur. pp. 401-482. En: P. Enfantin, P. (1858), Saint-Simon, H. (1813). *Science de l'homme physiologie religieuse*. Librairie Victor Masson.

[https://books.google.com.ar/books?id=dqtbAAAACAAJ&pg=PA241&source=gbs\\_toc\\_r&cad=4#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ar/books?id=dqtbAAAACAAJ&pg=PA241&source=gbs_toc_r&cad=4#v=onepage&q&f=false)

Seitz, M. J., Dietrich, F. & Köster, G. (2014). *Transportation Research Procedia*. 2:282–290.

Seitz, M. J. (2016). *Simulating pedestrian dynamics: Towards natural locomotion and psychological decision making*. Technische Universität München.

<https://mediatum.ub.tum.de/download/1293050/1293050.pdf>

Strogatz, S. (2004). The physics of crowds. *Nature*, 428, 367–368.

Thompson, P., Nilsson, D., Boyce, K., Molloy, M. & McGrath, D. (2020). Exploring the biomechanics of walking and crowd 'flow'. *Fire and Materials*, 44, 879 - 893. Disponible en: [https://pure.ulster.ac.uk/ws/files/79563325/Accepted\\_Paper\\_Biomechanics\\_Crowd\\_Movement.pdf](https://pure.ulster.ac.uk/ws/files/79563325/Accepted_Paper_Biomechanics_Crowd_Movement.pdf)

Tolstoy, L. (1869); Maude, L. & A. (trad.) (1910); Claridge, H. & O. (introd.) (2001). *War and Peace*. Book 13, Chapter 14; pp. 800-801. Wordsworth.

Vega, M. F. (2015). *NTP 390: La conducta humana ante situaciones de emergencia: análisis de proceso en la conducta individual*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo – Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.

**Fecha de recepción: 4/10/2022**

**Fecha de aprobación: 5/12/2022**