

ANÁLISIS DEL FLUJO PEATONAL A TRAVÉS DE UN DIAGRAMA FUNDAMENTAL MACROSCÓPICO (MFD)

Ignacio Arismendi, Pontificia Universidad Católica de Chile, itarisme@uc.cl
Juan Carlos Herrera, Pontificia Universidad Católica de Chile, jch@ing.puc.cl

RESUMEN

En este trabajo proponemos el uso de un Diagrama Fundamental Macroscópico (MFD en inglés) para estudiar una zona de flujo peatonal. La recopilación de datos se hizo a partir de experimentos controlados con voluntarios. La configuración de la zona a estudiar fue inspirada en una mezzanina de estación de metro de Santiago. De los resultados se concluyó que no solo importa la acumulación de peatones en un área, sino también la composición de esta para encontrar un valor óptimo de la tasa de salida (o finalización de viajes) de una zona peatonal. Se requieren más estudios para generalizar los hallazgos.

Palabras clave: *peatones, mfd, congestión*

ABSTRACT

In this paper, we propose the use of a Macroscopic Fundamental Diagram (MFD) to study a pedestrian zone. The data collection was done from controlled experiments with volunteers. The configuration of the studied area was inspired by a mezzanine of a metro station in Santiago. From the results, we concluded that not only the accumulation of pedestrians in an area, but also the composition of pedestrians, are necessary to find an optimal value of the exit rate (or completion of trips) of a pedestrian zone. More studies are needed to generalize the findings.

Keywords: *pedestrians, mfd, congestion*

1. INTRODUCCIÓN

La congestión peatonal es un problema comúnmente observable durante eventos masivos. Sin embargo, hoy existen etapas dentro del viaje diario de una persona donde es frecuente enfrentarse a ella. Es el caso de lo que ocurre en algunas estaciones del transporte público, como grandes paraderos, estaciones de intercambio modal, estaciones de trenes o metro. En específico, en este estudio nos inspiramos en el fenómeno de congestión, ocurrido principalmente en estaciones del metro de Santiago de Chile, la cual puede comenzar en los andenes y seguir aguas arriba, hasta la mezzanina, e incluso a veces hasta fuera de la estación. Si bien, esta congestión peatonal ocurre en específicos puntos críticos de la red durante la hora punta, nos enfocaremos en lo que ocurre en la mezzanina de algunas estaciones. Estos espacios se ubican entre la superficie y el andén (entrepiso), donde por lo general se ubican las boleterías del metro. Estas zonas peatonales suelen congestionarse, para descongestionar los andenes y pasillos que llevan a estos, por motivos de seguridad.

Así a fin de implementar estrategias de control peatonal cuando esta área se encuentra congestionada, se requiere indicadores claros del rendimiento que está teniendo en un momento determinado. Esta dinámica sugiere entonces una herramienta que permita conocer el valor de estos indicadores en tiempo real para tomar decisiones oportunas, de manera responsable. Sin embargo, hoy en día pareciera ser difícil poder generar indicadores claros y en tiempo real a nivel de flujo peatonal, al menos por las siguientes dos razones: la primera, la baja posibilidad de contar con tecnología que permita hacer esto en vivo, de forma automática y precisa; y la segunda, abarcar las distintas actividades a realizarse dentro de la mezzanina (uso de boleterías, automáticas y manuales, torniquetes y cajeros, espera de pasajeros para reunirse con otras personas, uso de zonas *wi-fi*, entre otras) que generan distintas demoras en los tiempos de viaje de los usuarios por esta.

El objetivo de este artículo es presentar una nueva metodología para evaluar el rendimiento de una zona peatonal, mediante el uso de un Diagrama Fundamental Macroscópico (MFD, en inglés). La Sección 2 presenta el MFD y sus estudios previos en redes vehiculares y zonas peatonales. A continuación, la Sección 3 muestra la metodología implementada para evaluar una zona peatonal mediante experimentos controlados, la definición de escenarios, manejo de datos y formulación de variables. Luego, la Sección 4 entrega los resultados obtenidos para los experimentos realizados. Y finalmente, la Sección 5 muestra las principales conclusiones de este trabajo.

2. ANTECEDENTES

Los fundamentos del MFD se encuentran en los estudios de Daganzo (2005, 2007), donde se propone modelar el tráfico de grandes zonas urbanas de manera dinámica y a nivel agregado. Básicamente, un MFD para una determinada zona consiste en una relación entre la tasa de salida de vehículos de esa zona (considerando las llegadas a destino dentro de ella) y el número de vehículos circulantes de esa misma zona (acumulación). Así, las principales variables que definen el MFD se calculan según las Ecuaciones 1 y 2.

$$n(t) = n_0 + A(t) - L(t) \quad (1)$$

$$G(n(t)) \equiv \frac{dL}{dt}(t) \quad (2)$$

$n(t)$: Acumulación en la zona en el instante t [per]

n_0 : Acumulación inicial en la zona [per]

$A(t)$: Curva acumulada de llegadas a la zona al instante t [per]

$L(t)$: Curva acumulada de salidas de la zona al instante t [per]

$G(n(t))$: Tasa de salida de la zona en el instante t [per/tiempo]

La forma del MFD es similar a la de un diagrama fundamental a nivel de un arco. Por lo tanto, con un diagrama bien definido es posible identificar el valor crítico de la acumulación que maximiza la descarga total de la red. Un MFD está asociado a una red por su geometría y operación, y debiera ser igual todos los días, sin importar la estructura de viajes. Geroliminis y Daganzo (2007, 2008) estudian y verifican la existencia de un MFD en redes vehiculares con simulación (Avenida Lincoln, Los Ángeles y el centro de San Francisco, USA) y datos empíricos (Yokohama, Japón).

El uso de un MFD tiene la ventaja de requerir poca información y la posibilidad de tomar decisiones en tiempo real conociendo el valor de las variables que lo componen. A nivel vehicular, esto se ha realizado con tecnología capaz de identificar a los autos que recorren la red. Sin embargo, a nivel peatonal esto es aún un desafío. En esta línea, los estudios previos de MFD peatonales son escasos y destacamos el trabajo de Hoogendoorn *et al.* (2011) donde se encuentra un MFD con datos empíricos para dos cuellos de botella, por separado, con flujos peatonales unidireccionales. Ambas situaciones entregaron resultados similares, esto es, un MFD que presentó flujos que crecieron con la acumulación hasta un cierto valor de capacidad de descarga del cuello de botella, según el ancho de este. Por eso, también se simuló el flujo peatonal en el Hall Central del Schiphol Plaza, Amsterdam, una zona de caminata más compleja, con el fin de verificar la existencia del MFD en un área más grande con flujos multidireccionales. Se encontró una relación entre el flujo promedio de la zona y la acumulación. Los autores destacan la posibilidad de encontrar un MFD para un área bidimensional, dependiente de la geometría y uso que se le dé, donde factores como la composición del flujo (propósito de viaje, género, edad) y factores sicológicos (prisa) podrían tener distintos efectos. Otro trabajo interesante de analizar a nivel peatonal es el realizado por Daamen *et al.* (2013). Basándose en los resultados recién presentados, proponen que el flujo promedio del área depende no solo de la acumulación, sino que también de cómo se distribuyen los peatones en el espacio, es así como introducen la desviación estándar de la densidad como otra variable explicativa. Mediante simulación concluyen que una menor variación espacial de la densidad conlleva menores flujos. Las altas variaciones a su vez implican mayores flujos. Además, declaran que la forma del MFD y el comportamiento según la desviación de la densidad, están ligados a los patrones de flujos (en su estudio incluyeron flujo unidireccional y flujos que se cruzan). Las dinámicas que se pueden observar en una mezzanina, en efecto, entregan distintos patrones de flujo, distribuciones espaciales de la densidad, composición peatonal y dinámicas de control del flujo. Por eso, ambos artículos son buenos antecedentes y avalan la posibilidad de encontrar un MFD en una zona de dinámicas complejas similares a la de una mezzanina.

3. METODOLOGÍA

Hoogendoorn *et al.* (2011) sugieren investigar la relación entre la forma del MFD y los factores que podrían impactar en ella, mediante simulación, pero preferentemente de manera empírica. Agregan que las dificultades de esto se centran principalmente en lo demandante que se puede tornar la obtención de datos, en particular para áreas grandes, y en el requerimiento de técnicas avanzadas de recolección de datos. Además, una amplia revisión de varios modelos de simulación de peatones (autómatas celulares, de fuerzas sociales, basados en velocidad, continuos, híbridos, de comportamiento y de redes), realizado por Duives *et al.* (2013), concluyó que ninguno es capaz de representar todos los fenómenos observables en un ambiente peatonal, a una velocidad aceptable. Dadas estas sugerencias, la puesta en escena y obtención de datos se realizará en un ambiente experimental. Los experimentos controlados entregan la posibilidad de observar el comportamiento real de los peatones, bajo escenarios artificiales a estudiar. Sumado a eso, permiten un registro de los datos sin restricciones, permitiendo utilizar libremente cualquier método de obtención de datos, sin requerir de permisos especiales. Los resultados pueden ser acotados, sin embargo, son precisos y fieles a la realidad.

3.1 Experimentos

Las mediciones se realizaron en una sala de estudios de la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago. Esta sala posee $12,2 \times 12,2 \text{ m}^2$ de superficie y se observa en la Figura 1 (rectángulo continuo). Dentro de ella, se delimitó con cuerdas y separadores de fila una sub-área de $8,4 \times 6 \text{ m}^2$ (rectángulo segmentado). Esta sub-área representa la zona de estudio en la cual se realizaron mediciones. Rodeando esta zona de estudio se encuentra la zona de retorno utilizada por los voluntarios para moverse rápidamente a su nuevo punto de ingreso una vez que salen de la zona de estudio. En esta zona de retorno no se realizaron mediciones.

Entre ambas zonas existen cinco accesos: A y E (línea verde) representan entradas y salidas, desde y hacia los pasillos conectados con la superficie, respectivamente; B y D (línea azul) representan entradas periódicas a la mezzanine desde los andenes; y C (línea roja) representa la salida de usuarios hacia el andén por los torniquetes C₁ y C₂, ambos con una tasa de atención especificada para cada escenario a representar. El ancho de los accesos fue de 2 m., a excepción de los torniquetes que fue de 1,5 m., cada uno. En la Figura 1, se observan además un cuadrado y un círculo negro, ambos pilares inamovibles de la sala de estudio (dibujados a escala).

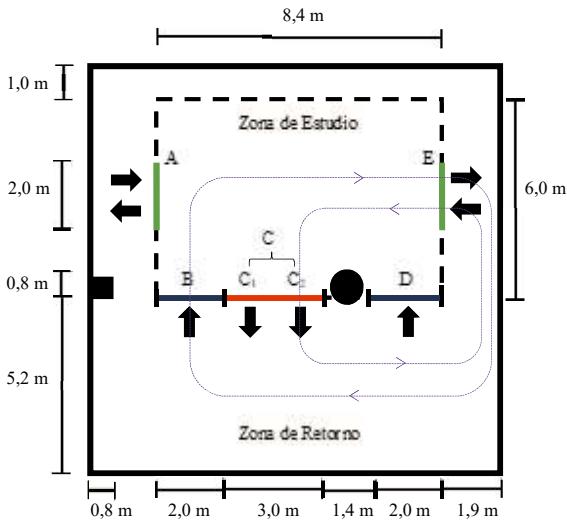


Figura 1: Bosquejo de la puesta en escena. Flechas indican dirección del flujo.

Se realizaron dos experimentos en días diferentes con distintos voluntarios. Existen dos tipos de voluntarios, los controladores y los peatones. En cada experimento, cuatro voluntarios fueron instruidos para actuar como controladores en los puntos de acceso B, D y C de la zona de estudio (uno en cada acceso B, D y dos en C). Los controladores de B y D dieron el paso a los peatones que querían ingresar por aquellos accesos cada 30 segundos, representando cargas de pelotones como si vinieran de un mismo tren. Mientras que los controladores de C atendieron individualmente a los peatones que se dirigían a la cola de los torniquetes, según la tasa de atención indicada para cada escenario.

El resto de los voluntarios fueron instruidos como peatones. A cada uno de ellos se les indicó puntos de ingreso-a y egreso-de la zona de estudio. En la Figura 1, las trayectorias (línea segmentada púrpura) representan el circuito que debieron recorrer voluntarios con orígenes-destino B-E y E-C, a modo de ejemplo. Esta forma de trabajo significa una trayectoria cíclica por parte de estos voluntarios, lo que permite mantener un constante flujo de personas ingresando a la zona de estudio sin requerir demasiados voluntarios.

Se planificaron distintos escenarios en base a distintos parámetros: demanda (baja, media o alta), dirección de viajes (mayor cantidad de viajes al andén o desde el andén) y tasa de atención de los torniquetes (0, 10, 15, 20 o 30 personas por minuto). Combinando todos los parámetros se puede obtener un total de 30 posibles escenarios, de estos solo se seleccionaron 12, resumidos en la Tabla 1. Es decir, durante un mismo experimento se modificaron algunos parámetros para representar distintos escenarios. El momento de cambio de escenario durante el experimento era avisado mediante un silbato.

La grabación de los fenómenos ocurridos en los experimentos se hizo mediante el registro videográfico de cámaras *Samsung Flash Memory SD Camcoder* (30 fps) ubicadas en altura, apuntando hacia los cinco accesos.

Tabla 1: Instrucciones a voluntarios por escenario de cada medición.

Experimento	Duración [min]	Demanda	Instrucciones	
			Viajes con dirección a C (% de la Demanda)	Tasa de atención [per/min]
1	5	Baja	41%	15
1	5	Baja	41%	30
1	10	Media	39%	30
1	10	Media	25%	15
1	5	Baja	27%	15
1	5	Baja	27%	30
2	5	Alta	49%	0
2	5	Alta	49%	10
2	5	Alta	49%	20
2	5	Alta	30%	20
2	5	Alta	30%	10
2	5	Alta	30%	0

3.2 Bases de Datos construidas

Una vez realizados los experimentos, procedimos a extraer los datos manualmente de las cámaras mediante revisión visual y se construyeron dos bases de datos. A la primera la llamaremos base de datos de ingresos y egresos. Dentro de esta base de datos existe una fila por cada ingreso y egreso en la zona de estudio y además se registra el acceso por el que se pasó y el voluntario (registro de ID) que lo hizo. Con esta información es posible construir la curva acumulada de ingresos o llegadas a la zona de estudio y la curva acumulada de egresos o salidas de la zona de estudio.

A la segunda la denominamos base de datos de viajes, la cual se obtiene a partir de la anterior. Para cada pasada de un voluntario por la zona de estudio conocemos los instantes y puntos de ingreso y egreso. Esta información caracteriza a un viaje, generado cada vez que un voluntario entra a la zona de estudio (recordar que cada voluntario ingresa en más de una ocasión a la zona de estudio). La tabla así posee viajes (filas) con el ID del peatón, sus respectivos tiempos de ingreso y egreso, puntos de entrada y salida, y finalmente una columna adicional que indica, en caso de dirigirse a C, el instante en que llegó a la cola para salir de la zona de estudios. Con esto es posible construir una curva acumulada de llegadas a la cola de C en un instante t. De todos modos, si no existe cola, el instante de salida difiere con el de llegada a la cola, dado que existe un tiempo de atención en C.

3.3 Definición de variables

Inicialmente, definimos las variables de acumulación y tasa de salida mediante las Ecuaciones 1 y 2, aplicadas sobre la zona de estudio. Estas serían suficientes para caracterizar un MFD. Sin embargo, observamos que, si la capacidad en el punto C no es suficiente para atender a la demanda que llegue ahí, se formará una cola aguas arriba de él. Esto implica que existirán peatones con distintas velocidades en la zona de estudio. Existen así los peatones que se dirigen en cola al punto

C (torniquetes), cuya velocidad es menor y su libertad está sujeta al movimiento de su predecesor y la tasa de atención en el acceso C. Y existen también los peatones que se dirigen a los puntos A y E (egreso de la estación), cuyas velocidades y libertad para moverse son mayores, pero que también pueden verse afectados o bloqueados por la cola en el punto de acceso C. Por lo anterior, postulamos que la fracción de peatones que va al punto C y se desplaza a una velocidad distinta del resto (en promedio) es una variable relevante para explicar el estado de tráfico peatonal en la zona de estudios experimental. A esta variable la llamaremos “composición a C” y se define según a la Ecuación 3.

$$\alpha(t) = \frac{LC(t)}{n(t)} \quad (3)$$

$\alpha(t)$: Composición a C en el instante t

$LC(t)$: Largo de colas total en C en el instante t [per]

Por construcción, $\alpha(t)$ requiere conocer la cantidad de peatones en cola dirigiéndose a C. La forma de calcular este valor en cada instante de tiempo t viene dado por la Ecuación 4.

$$LC(t) = LC_0 + Q(t) - L_C(t) \quad (4)$$

LC_0 : Largo de cola inicial [per]

$Q(t)$: Curva acumulada de llegadas a la cola [per]

$L_C(t)$: Curva acumulada de salidas por el acceso C [per]

Para estimar estas variables se agregó la información instantánea en intervalos de un minuto de largo. Esto generó un total de 70 puntos a analizar. El cálculo de la acumulación por intervalo k se realizó con un promedio integral de los distintos valores de la acumulación en el tiempo, dentro de un intervalo. Análogamente se realizó el cálculo del largo de colas total en C en un intervalo k . Finalmente, la composición a C en un intervalo k se calculó como una división entre los valores anteriores. Aquellas funciones se presentan en las Ecuaciones 5-7.

$$n(k) = \frac{\int_{t_i(k)}^{t_f(k)} n(t) dt}{t_f(k) - t_i(k)} \quad (5)$$

$$LC(k) = \frac{\int_{t_i(k)}^{t_f(k)} LC(t) dt}{t_f(k) - t_i(k)} \quad (6)$$

$$\alpha(k) = \frac{LC(k)}{n(k)} \quad (7)$$

$t_i(k)$: Instante cuando comienza el intervalo k [tiempo].

$t_f(k)$: Instante cuando finaliza el intervalo k [tiempo].

La tasa de salida se calculó mediante una aproximación lineal, entre los tiempos de inicio y final del intervalo, tal como muestra la Ecuación 8.

$$G(n(k)) \approx \frac{L(t_f(k)) - L(t_i(k))}{t_f(k) - t_i(k)} \quad (8)$$

Un viaje j corresponde a un trayecto (definido por su punto de ingreso y egreso) realizado por un individuo en la zona de interés. Estos se encuentran en la base de datos de viajes, explicada en la Sección 3.2. Cada fila de esta base de datos contiene viajes, el ID del voluntario que realizó cada uno, y sus tiempos de inicio y de fin asociados. Con esto, se construyen las variables de las Ecuaciones 9 y 10.

$$\tau_j = t_j^{out} - t_j^{in} \quad (9)$$

$$v_j = \frac{d_j}{\tau_j} \quad (10)$$

τ_j : Permanencia (o tiempo de viaje) asociada al viaje j [tiempo]

t_j^{out} : Instante en que finalizó el viaje j [tiempo]

t_j^{in} : Instante en que comenzó el viaje j [tiempo]

v_j : Velocidad media con la que se realizó el viaje j [distancia/tiempo]

d_j : Distancia recorrida estimada para el par O-D asociado al viaje j [distancia].

La distancia recorrida en cada trayecto no fue medida, por lo que a cada par O-D factible dentro de la zona estudiada se le asignó un valor constante estimado. Además, no todos los peatones contaron con un valor asociado de t_j^{out} , dado que algunos se encontraban dentro del área al finalizar las mediciones. Estos valores no fueron incluidos para calcular permanencias, ni velocidades, asociados a estos viajes.

Conocido el valor de la velocidad para un viaje, procedimos a calcular el valor de la velocidad media espacial para un intervalo k . Nos basamos en los estudios de cálculo de velocidad para espacios bidimensionales de Van Wageningen-Kessels *et al.* (2014) (quienes trabajaron a partir de las definiciones de Edie (1965)). Nuestra zona de estudio es un espacio bidimensional que comprende un área S constante para todo intervalo k . De esta manera la velocidad media espacial para un intervalo simplemente se calcularía como la razón entre la distancia recorrida por todos los viajes en esta ventana y la suma de sus tiempos asociados, tal y como se expresa en la Ecuación 11.

$$v_s(k) = \frac{\sum_j \tau_j(k) * v_j}{\sum_j \tau_j(k)} \quad \forall j \text{ observado en el intervalo } k \quad (11)$$

$\tau_j(k)$: Duración del viaje j en el intervalo k [tiempo].

Notar que $\tau_j(k)$ es la parte, de la permanencia de un viaje j , que el peatón estuvo en el intervalo k . Así, por ejemplo, si a un viaje le toma más de un intervalo completarse, su permanencia se distribuirá con una parte en cada uno de estos. Matemáticamente esto se explica con la Ecuación 12. Esto se define así dado que hay peatones que permanecen en la zona de estudio más de un intervalo, como se ejemplifica en la Figura 2.

$$\sum_k \tau_j(k) = \tau_j \quad (12)$$

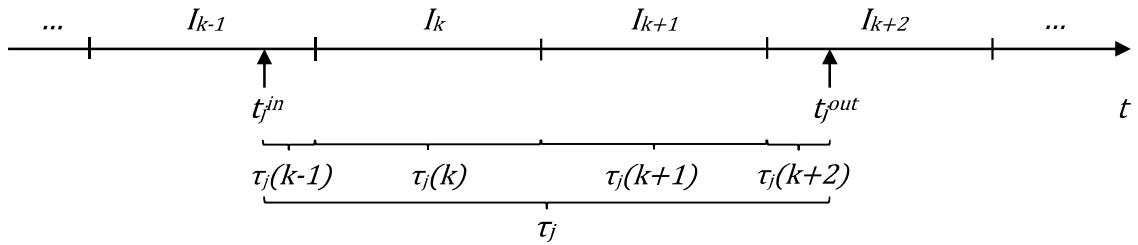


Figura 2: Ejemplo de un peatón que inicia y termina su viaje en intervalos diferentes.

4. RESULTADOS

Lo primero que hicimos fue revisar los resultados de ambos experimentos. Se puede observar en la Figura 3a que para los resultados del experimento 1 se presenta en promedio una correlación positiva de la tasa de salida con la acumulación de la zona de estudio. Esto define claramente un comportamiento de flujo libre. Sin embargo, al observar la Figura 3b, relacionada al experimento 2, encontramos en promedio una correlación negativa entre ambas variables, claro resultado esperado para estados de tráfico en congestión. De ahora en adelante hablaremos del experimento 1 como flujo libre y del experimento 2 como congestión indistintamente.

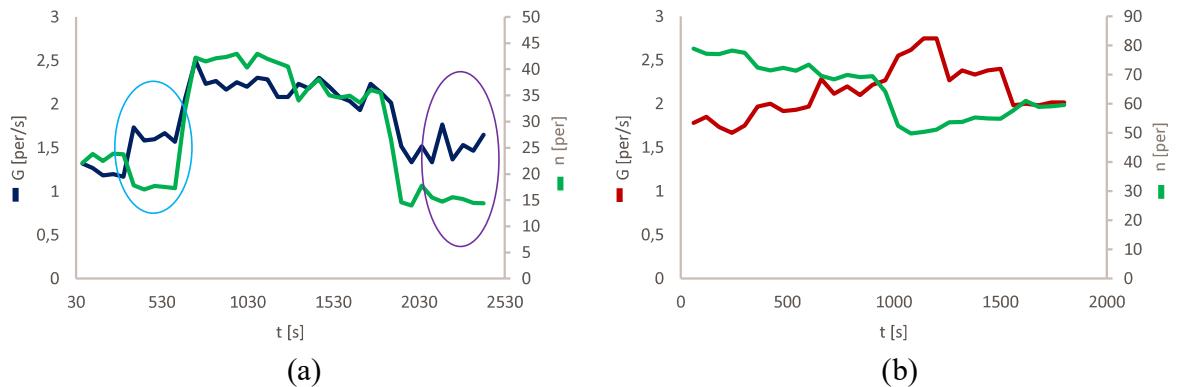


Figura 3: (a) Gráfico combinado con la tasa de salida y acumulación en el tiempo para el experimento 1 (flujo libre).
(b) Gráfico combinado con la tasa de salida y acumulación en el tiempo para el experimento 2 (congestión).

Adicionalmente, quisimos observar el comportamiento de la composición al punto C en el tiempo. En la Figura 4a se puede observar que, para flujo libre, la composición a C y la tasa de salida se mueven en promedio de manera conjunta. Sin embargo, en congestión ambas variables se mueven en sentidos opuestos, como se ve en la Figura 4b. Estos resultados iniciales nos hacen especular con la existencia de un valor de composición al punto C que maximiza la tasa de salida de la zona de estudio.

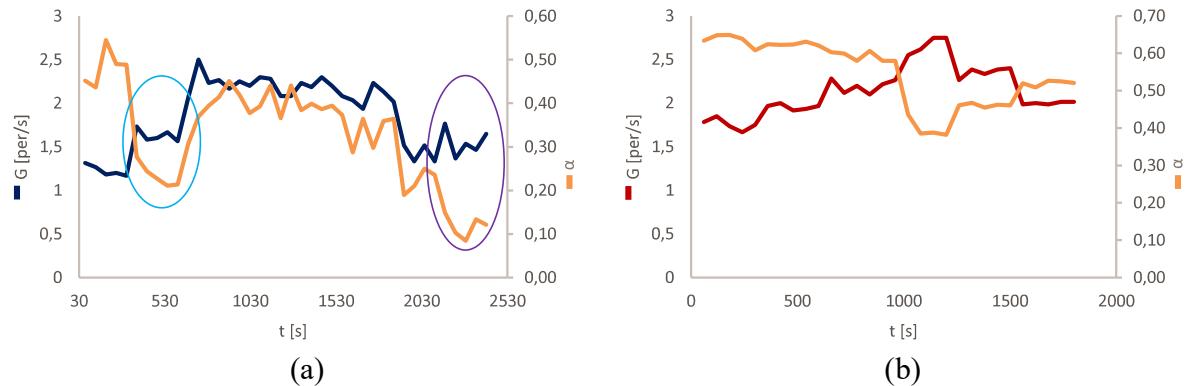


Figura 4: (a) Gráfico combinado con la tasa de salida y composición a C en el tiempo para el experimento 1 (flujo libre). (b) Gráfico combinado con la tasa de salida y composición a C en el tiempo para el experimento 2 (congestión).

Al observar las Figura 3a y 4a, se puede observar dos intervalos con comportamientos contrarios a las conclusiones anteriores. Primero hablaremos del intervalo marcado en ambas figuras por una elipse celeste. Se puede ver como en flujo libre ocurrió una disminución en la composición al torniquete. Esto tiene sentido pues este intervalo corresponde al escenario 2 del experimento 1, donde se duplicó la tasa de atención en C, respecto al intervalo anterior. Esto mismo provocó una disminución en la acumulación y posteriormente un aumento en la tasa de salida cercano a un 33%. Especulamos que esto ocurrió por la cola remanente en el punto C.

En segundo lugar, hablaremos del intervalo marcado en ambas figuras por una elipse púrpura. Se puede ver como en flujo libre ocurrió una disminución en la composición al torniquete. Esto tiene sentido pues este intervalo corresponde al escenario 6 del experimento 1, donde también se duplicó la tasa de atención en C, respecto al intervalo anterior. Sin embargo, esto no conllevó una disminución en la acumulación, la que se mantuvo casi constante en todo el escenario. A su vez la tasa de salida aumentó tan solo en un 10% (menos que en el caso anterior). Lo que sucedió acá es que la demanda a C era más baja que en la situación del escenario 2. Por lo tanto, existió capacidad ociosa del punto C, es decir, a pesar de aumentar la tasa de atención no hubo mejoras sustanciales en el rendimiento del sistema.

4.1 Acumulación como indicador de congestión

A partir de las variables calculadas en los intervalos de 1 minuto, se observó una clara relación entre los comportamientos de la tasa de salida G y la acumulación total n como lo muestra la Figura 5a. Finalmente, se observó que existe una relación entre n y la velocidad media espacial de la zona de estudio v_s (Figura 5b).

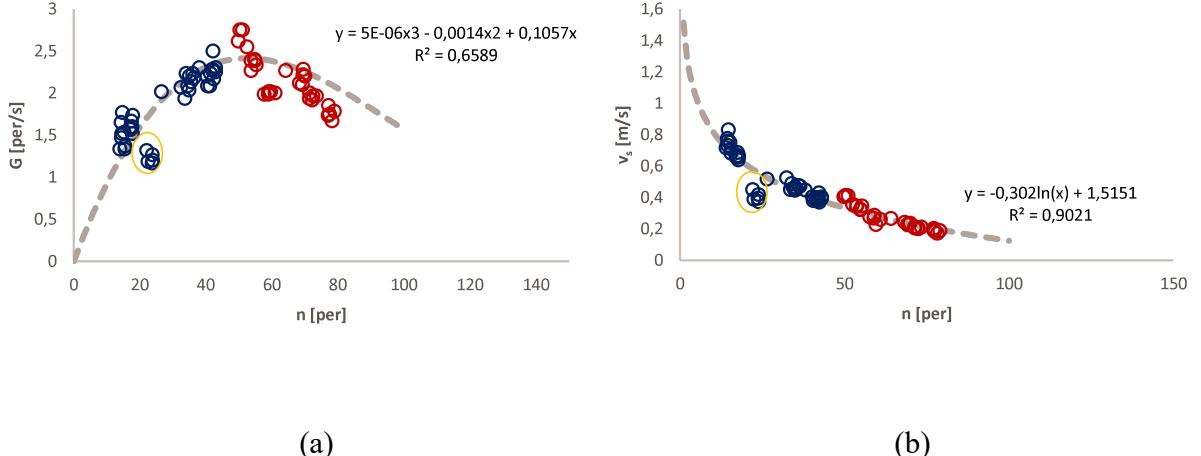


Figura 5: (a) Velocidad media espacial en función de la acumulación, por intervalo. (b) Tasa de salida en función de la acumulación, por intervalo. En azul resultados para experimento 1 (flujo libre); en rojo para experimento 2 (congestión).

Se observa que existe un valor de la acumulación que maximiza la tasa de salida de la zona estudiada. Este valor corresponde a la acumulación crítica n^* , la cual delimita el régimen a flujo libre y el de congestión en el MFD. Además, se observan en ambos gráficos un grupo de puntos que aparentemente se encuentran bajo los demás (elipse anaranjada). Estos puntos corresponden al escenario 1 del experimento 1, el cual particularmente contó con valores de composición a C bastante altos y tasas de atención en este punto bajas. Esto es interesante pues se observa una disminución de la tasa de salida en la rama a flujo libre del MFD.

4.2 Composición a C como indicador de congestión

Los gráficos presentados sugieren la existencia de un MFD para la zona de estudio. Sin embargo, se requirió mayor información para comprender qué está sucediendo dentro del espacio analizado. En la Figura 6a, se observa que existen múltiples valores de G , asociados a un mismo valor de α , tanto a flujo libre como en congestión. Por lo tanto, α debe ser complementado con la información que entrega la acumulación para saber qué tasa de salida se obtiene. Sin embargo, en la Figura 6a se observa, al igual que lo observado en la Figura 4a y 4b, que flujo libre G aumenta con α y en congestión disminuye con esta variable, en promedio. En la elipse de color anaranjada de la Figura 6a y 6b se encerraron los puntos del escenario 1 del experimento 1. Estos puntos se comportan de manera diferente a todos los demás del experimento 1. Esto sugiere observar dónde se ubican estos puntos en un plano $\alpha - n$ y cómo se relacionan con la tasa de salida.

En la Figura 6b se observa que, a un mayor valor de α , se pueden esperar menores velocidades medias espaciales. Esto tiene sentido, dado que con un mayor α se espera encontrar una acumulación compuesta mayoritariamente por peatones que se dirigen a C (peatones lentos). En caso contrario, se espera obtener una velocidad mayor. En flujo libre, cuando $\alpha = 0$ se debiera

alcanzar las velocidades a flujo libre de los peatones rápidos y si $\alpha = 1$ se debiera alcanzar la velocidad a flujo libre de los lentos. En cambio, en congestión el valor de la velocidad que se puede alcanzar va desde la crítica hasta 0. Cuando $\alpha = 0$ el rango irá desde la velocidad crítica de los peatones rápidos y cuando $\alpha = 1$ el rango se moverá desde la de los lentos. Podemos ver que para los valores extremos de α , se pueden encontrar dos gráficos de velocidad versus acumulación totalmente diferentes. Esto conllevaría gráficos de tasa de salida versus acumulación diferentes, dependiendo del valor de α .

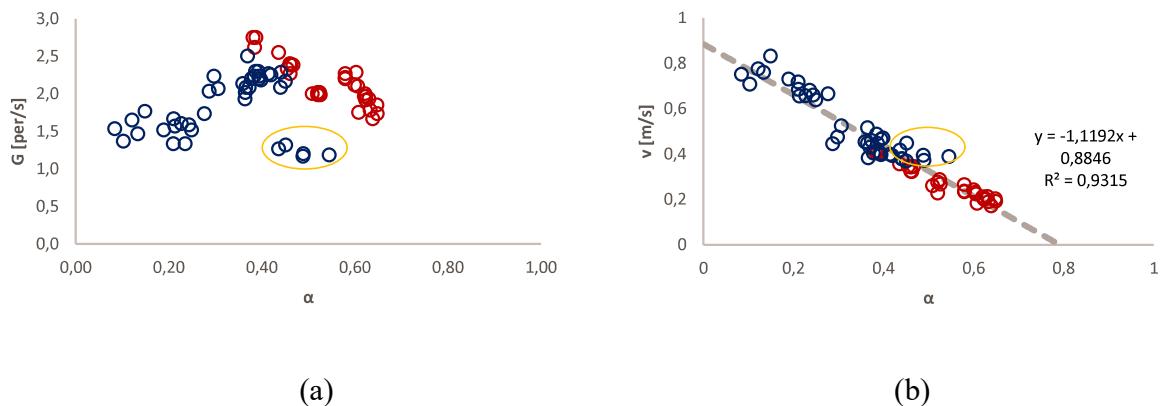


Figura 6: (a) Tasa de salida en función de α , por intervalo. (b) Velocidad media espacial en función de α , por intervalo. En azul resultados para experimento 1 (flujo libre); en rojo resultados para experimento 2 (congestión).

4.3 3D-MFD

La idea de un MFD graficado en tres dimensiones (3D-MFD) no es nueva. Geroliminis *et al.* (2014) hicieron un estudio, mediante simulación, para analizar la forma de un 3D-MFD dependiente de la acumulación de buses y la acumulación de autos. Dado que los buses son de diferente tamaño y realizan más detenciones que los autos, conllevo menores velocidades, se esperaría encontrar rendimientos diferentes de la red para composiciones diferentes de tráfico. Bajo esa noción, los autores encontraron un 3D-MFD, donde relacionaron el flujo medio de la red según estas dos acumulaciones, de buses y autos. Estos antecedentes sugieren que, para entidades con diferentes comportamientos, se podría encontrar un 3D-MFD.

En nuestro estudio hay peatones con distintos comportamientos y velocidades (lentos y rápidos). Sin embargo, para observar la influencia de n y α sobre G graficaremos el 3D-MFD con estas tres variables como ejes. Este se presenta en la Figura 7. Además, desde este gráfico se pueden calcular las acumulaciones de peatones lentos y rápidos de manera sencilla para un punto (n, α, G) : la primera, indicada por el rectángulo de área αn ; la segunda, complementariamente a esta, representada por el rectángulo de área $(1 - \alpha)n$. Ambas áreas se encuentran en la Figura 7.

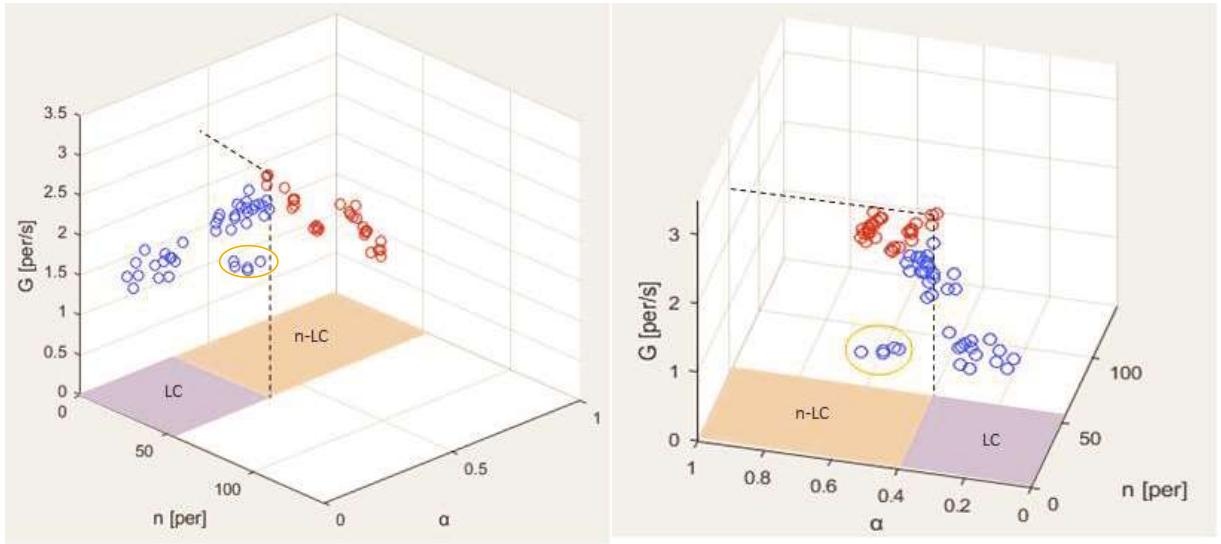


Figura 7: 3D-MFD para la tasa de salida en función de la acumulación y la composición a C, por intervalos. Áreas de rectángulos representan la acumulación de peatones lentos (morado) y rápidos (anaranjado). En azul resultados para experimento 1 (flujo libre); en rojo para experimento 2 (congestión).

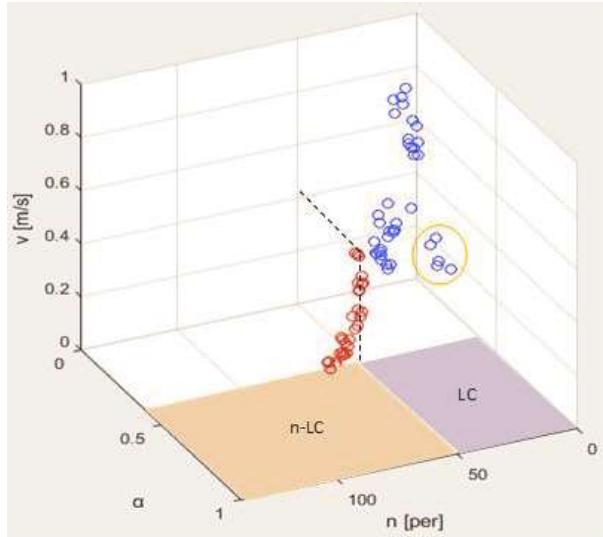


Figura 8: Gráfico 3D de la velocidad en función de la acumulación y la composición a C, por intervalos. Áreas de rectángulos representan la acumulación de peatones lentos (morado) y rápidos (anaranjado). En azul resultados para experimento 1 (flujo libre); en rojo para experimento 2 (congestión).

En el 3D-MFD, no hablamos de acumulación crítica, sino más bien de un rango de acumulaciones donde se encuentran los valores más altos para la tasa de salida de la zona de estudio. A su vez, este rango de acumulaciones críticas está relacionado a un rango de composiciones a C críticas. Estos dos rangos críticos se asocian finalmente a un rango de valores óptimos de la tasa de salida G^* . Para este estudio estos rangos se definieron alrededor de los valores $n^* = 50,7 \text{ [per]}$ y $\alpha^* = 0,38$, los cuales entregaron una tasa de salida máxima $G^* = 2,8 \text{ [per/s]}$. Estos se observaron en el cuarto escenario del segundo experimento, con una demanda alta (30% de esta con dirección a

C) y una tasa de atención de 20 [per/min]. Esta tasa de atención fue la mayor del segundo experimento, pero menor que la más alta del experimento 1 (30 [per/min]). El largo de cola total en C (peatones lentos), asociado a los valores óptimos, fue cercano a $LC^* = 19,5$ [per]. Este fue el segundo menor valor observado durante el experimento 2, pero mayor que otros observados en el experimento 1. Esto tiene sentido, pues bajos valores de esta variable implicarían que el torniquete no funcione a capacidad (capacidad ociosa), lo que no es eficiente cuando se busca maximizar la tasa de salida total. Por el contrario, colas muy altas aumentarían la presencia de peatones lentos, lo que conllevaría una disminución en la velocidad y finalmente en la tasa de salida de la zona de estudio. La velocidad media espacial asociada a estos rangos óptimos se encontró cerca de $v_s = 0,41$ [m/s] y se puede observar en la Figura 8. Este valor fue el más alto para el experimento 2, pero no el mayor si comparamos con los valores calculados para el experimento 1.

Finalmente, se observa en la Figura 7 y 8 que los puntos del escenario 1 del experimento 1 (elipse anaranjada) parecieran seguir otra caída del 3D-MFD y 3D-Velocidades. Especulamos que si estos gráficos se tuvieran por completo se observaría una superficie que cubriría todo el dominio de las variables independientes. En otras palabras, veríamos distintas formas de MFD para distintos α .

5. CONCLUSIONES

En este artículo se propuso la existencia de un MFD en una zona de tránsito peatonal inspirada en una mezzanina de estación de Metro de Santiago. En particular, y dada la presencia en ocasiones de peatones circulando a velocidades distintas, se propuso el uso de un 3D-MFD para analizar macroscópicamente el comportamiento de un área peatonal.

Los resultados de este estudio sugieren que existe una relación clara entre la tasa de finalización de viajes (o salida) de la mezzanina y la acumulación de peatones dentro de ella. Sin embargo, la composición de la acumulación de peatones, entrega mayor información sobre lo que realmente ocurre en estos espacios. Esto cobra sentido al observarse dos tipos de peatones dentro de la zona de estudio: peatones lentos que esperan a su predecesor para poder moverse; y peatones más rápidos que se mueven libremente a su salida. En específico, en este estudio hablamos de peatones que se dirigen al punto C y otros que caminan hacia A y E. Entonces, se propuso una variable α que representa la proporción de peatones, dentro de la zona de estudio, que se dirigen en cola a C. Con esta nueva variable se observó un punto óptimo, compuesto por la acumulación crítica n^* y la composición crítica α^* , las cuales se asocian a una tasa de salida máxima G^* del área.

El óptimo del sistema no tiene por qué estar asociado a las velocidades medias espaciales más altas o valores de largos de cola a los torniquetes más bajos. Mayores esfuerzos son necesarios para estudiar una zona peatonal y evaluar distintos escenarios que pueden conllevar a distintos estados de tráfico que maximicen la tasa de salida de esta.

Los experimentos controlados para analizar flujos peatonales resultaron ser opciones atractivas, pues entregaron información real fidedigna de lo que ocurría en la zona estudiada. Sin embargo, requieren de mayores esfuerzos al medir. El complemento con simulación podría ser conveniente, siempre que se considere el modelo más adecuado para la situación a representar.

En el futuro, sería interesante incluir a este sistema un estudio de dos regiones congestionadas: los andenes y la mezzanina. Las decisiones operacionales de cierre de torniquetes suelen darse por la acumulación en los andenes. Este tipo de estudios explicaría de mejor forma lo que ocurre en una estación de metro y convertiría la tasa de atención de torniquetes en una variable endógena del sistema. Otros estudios podrían enfocarse en la implementación práctica de este tipo de conteos, mediante tecnologías que informen a operadores y peatones del estado de congestión de la estación. Finalmente, se abre la posibilidad de indagar más en la definición de la variable α aquí presentada. Podría considerarse como variables las composiciones de la acumulación de peatones que van desde otros orígenes a otros destinos, dentro de la zona de estudio, procurando establecer las características de comportamiento que los diferencian de otros peatones. El análisis de estas variables podría complementarse además con el impacto en la tasa de salida por cada acceso y en las velocidades asociadas a cada uno de los tipos de peatón propuestos.

REFERENCIAS

- Daganzo, C.F. (2005) Improving city mobility through gridlock control: an approach and some ideas. Working Paper UCB-ITS-VWP-2005-1, **UC Berkeley Center of Excellence on Future Urban Transport**, University of California, Berkeley, CA.
- Daganzo, C.F. (2007) Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches. **Transportation Research Part B** **41**(1), 49–62.
- Daamen, W., V.L. Knoop y S.P. Hoogendoorn (2014) Generalized macroscopic fundamental diagram for pedestrian flows. En Chraiba M., M. Boltes, A. Schadschneider y A. Seyfried (Eds.) **Traffic and Granular Flow'13**, 41-46. Springer International Publishing.
- Duives, D.C., W. Daamen y S.P. Hoogendoorn (2013) State-of-the-art crowd motion simulation models. **Transportation research part C: emerging technologies**, 37, 193-209.
- Edie, L.C. (1965) Discussion of Traffic Stream Measurements and Definitions. **Proceedings of the 2nd International Symposium on the Theory of Traffic Flow** (J. Almond, ed.), Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 1965, 139–154.
- Geroliminis, N., C.F. Daganzo, (2007) Macroscopic modeling of traffic in cities. **86th Annual Meeting of the Transportation Research Board**, Washington, DC.
- Geroliminis, N., C.F. Daganzo (2008). Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: some experimental findings. **Transportation Research Part B** **42** (9), 759–770.
- Geroliminis, N., N. Zheng y K. Ampountolas (2014) A three-dimensional macroscopic fundamental diagram for mixed bi-modal urban networks. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, **42**, 168-181.
- Hoogendoorn, S.P., M.C. Campanella y W. Daamen (2011) Fundamental diagrams for pedestrian networks, **Pedestrian and Evacuation Dynamics** (Springer, New York, 2011), 255–264
- Van Wageningen-Kessels, F.L.M., S.P. Hoogendoorn y W. Daamen. (2014) Extension of Edie's Definitions for Pedestrian Dynamics. **Transportation Research Procedia**, **Vol. 2**, 2014, 507–512.