

COMPORTAMIENTO DE PASAJEROS EN ESCALERAS MECÁNICAS DE METRO Y SU IMPACTO EN LA CAPACIDAD Y EXPERIENCIA DE USO

Ariel López, Universidad de Chile ariellopez@ug.uchile.cl

Sebastián Seriani, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso sebastian.seriani@pucv.cl

Anibal Tapia, Universidad de los Andes aetapia@miuandes.cl

RESUMEN

El comportamiento de los pasajeros en las estaciones de metro es influenciado por múltiples factores, incluyendo aspectos ambientales, culturales y temporales. Estos factores determinan la dinámica de uso de las escaleras mecánicas en las estaciones. En el marco de esta investigación, se llevaron a cabo estudios en escaleras mecánicas del metro de Santiago de Chile utilizando la visión artificial DataFromSky. Posteriormente, se desarrolló un simulador de escaleras utilizando Anylogic para analizar y comprender mejor el comportamiento observado. Se identificó que en ciertas ocasiones, los pasajeros optan por detenerse en un lado de la escalera, permitiendo que otros avancen, mientras que en otros contextos, los pasajeros se detienen en ambos lados. Los resultados revelan que la disposición de las personas a adelantar en la escalera mecánica está fuertemente influenciada por condiciones de entorno, como el propósito del viaje, y la hora del día. Además, se observó una variabilidad significativa en el comportamiento de los pasajeros en función de la cultura local y otros factores ambientales. Este estudio aporta valiosa información sobre cómo los factores ambientales, culturales y temporales afectan el comportamiento humano en espacios públicos y la experiencia del usuario en el transporte público.

Palabras claves: Metro, estación, escaleras mecánicas, visión artificial, simulación

ABSTRACT

Passenger behavior in metro stations is influenced by multiple factors, including environmental, cultural, and temporal aspects. These factors determine the dynamics of escalator use in the stations. Within the framework of this research, studies were conducted on escalators in the Santiago de Chile metro using the DataFromSky artificial vision. Subsequently, an escalator simulator was developed using Anylogic to analyze and better understand the observed behavior. It was identified that on certain occasions, passengers choose to stop on one side of the escalator, allowing others to advance, while in other contexts, passengers stop on both sides. The results reveal that people's willingness to overtake on the escalator is strongly influenced by environmental conditions, such as the purpose of the trip, and the time of day. Additionally, significant variability was observed in passenger behavior based on local culture and other environmental factors. This study provides valuable insights into how environmental, cultural, and temporal factors affect human behavior in public spaces and the user experience in public transport.

Keywords: Metro, station, escalators, artificial vision, simulation

1. INTRODUCCIÓN

El Metro de Santiago, el sistema de transporte subterráneo de Santiago, Chile, ha experimentado una transformación significativa a lo largo de los años, convirtiéndose en el principal medio de transporte para una gran cantidad de santiaguinos. Con 7 líneas operativas, 136 estaciones distribuidas en sus diferentes líneas y una longitud total de aproximadamente 140 kilómetros, el Metro de Santiago transportó a 695 millones de pasajeros en 2019 (Lara, 2019). Este sistema ha sido reconocido como uno de los sistemas de transporte subterráneo más modernos y eficientes de América Latina, destacando por su puntualidad, seguridad y comodidad para los pasajeros (Vecchio, 2021).

La expansión continua de la red, con la implementación de nuevas líneas, ha permitido ampliar su rango de cobertura, ofreciendo acceso a un mayor número de usuarios. Se espera que en un futuro cercano se inauguren aún más líneas, lo que indica que la demanda del Metro de Santiago seguirá en aumento.

Estaciones de Metro y su Dinámica

Diariamente, el sistema de Metro en Santiago registra alrededor de 2,9 millones de viajes (Metro de Santiago, 2019). Esta alta demanda se refleja especialmente durante las horas punta, donde se observa una mayor congestión y tiempos de desplazamiento y espera prolongados. Según un estudio de *MoovitApp*, el tiempo promedio de viaje en el Metro de Santiago es de 84 minutos diarios. Además, el 74% de los pasajeros realiza al menos un transbordo, y el 26% lo hace más de dos veces (MoovitApp, 2019).

Esta dinámica genera problemas de aglomeración en las estaciones, especialmente en puntos de conexión entre diferentes espacios. Seriani y Fernández (2015) identificaron cinco espacios clave en las estaciones: tren-andén, andén-escaleras, mezzanina, complementario (como comercios) y superficie. Todos estos espacios están interconectados principalmente a través de escaleras. Además, investigaciones como la de Zhao *et al.* (2021) han investigado la dependencia de los pasajeros con las funciones de las estaciones, y López (2016) las topologías, configuraciones y distintas dinámicas según la configuración de las estaciones.

Las Escaleras Mecánicas en el Metro

Las escaleras, ya sean manuales o mecánicas, juegan un papel crucial en la eficiencia de las estaciones. Permiten a los pasajeros trasladarse rápidamente, cómoda y seguramente entre diferentes áreas. Las escaleras mecánicas, en particular, agilizan este proceso. Sin embargo, su eficiencia puede verse comprometida por la alta aglomeración de pasajeros, comportamientos inadecuados o configuraciones espaciales inapropiadas que generan cruces de flujos peatonales.

La seguridad es una preocupación primordial, especialmente con el aumento constante de la población en la ciudad. La tasa de accidentes en escaleras mecánicas ha sido del 18% (Metro de Santiago, 2018), lo que resalta la necesidad de medidas preventivas. Además, existe una cultura de comportamiento en las escaleras mecánicas, donde los pasajeros no suelen situarse en el lado derecho, obstaculizando el paso de otros. Para abordar esto, algunas estaciones han implementado

señalizaciones y otras medidas, aunque aún se desconocen sus efectos completos. Estudios como el de Zhang *et al.* (2023) han arrojado luz sobre el comportamiento de selección de los pasajeros en este contexto, mientras que investigaciones como la de Li *et al.* (2019) han modelado el pánico de grupos de pasajeros en situaciones de emergencia.

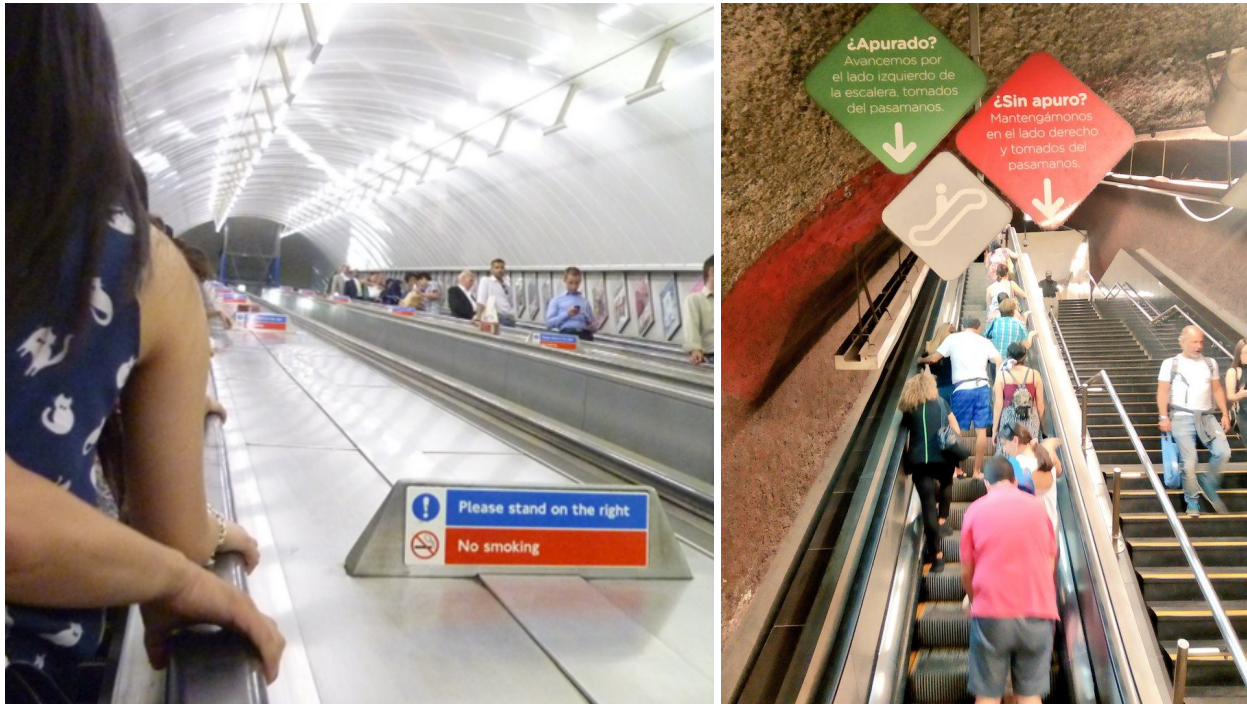


Figura 1 (izquierda) Escaleras mecánicas en metro de Londres con indicadores auditivos y visuales.

Fuente: The Guardian (2019). | (derecha) Estación Plaza Egaña L4-L3. Fuente: Ariel López

Objetivo del Estudio

Este estudio tiene como objetivo analizar el comportamiento de los pasajeros en las escaleras mecánicas de las estaciones de metro. Se busca definir variables relevantes, observar comportamientos actuales, comprender la relación entre comportamiento y capacidad de las escaleras y simular el flujo de pasajeros mediante software.

El artículo se organizará de la siguiente manera: la sección 2 introduce a estudios de escaleras en estaciones de metro, en la sección 3 se presentan los casos estudiados, la sección 4 presenta un análisis de simulación y la sección 5 presenta las conclusiones.

2. ESCALERAS MECÁNICAS EN ESTACIONES DE METRO

El análisis de las escaleras en estaciones de metro es una pieza clave para mejorar la eficiencia y seguridad de los pasajeros. La congestión en la entrada de las escaleras mecánicas, conocida como cuello de botella, afecta directamente los tiempos de viaje y la experiencia del usuario. Según Al Widyen *et al.* (2016), el comportamiento de los pasajeros en esta área es esencial para estimar la capacidad de la escalera. Su investigación concluyó que al influir en el movimiento de las personas, se puede mejorar la eficiencia de los flujos y reducir los tiempos de viaje.

Un estudio detallado realizado en el Metro de Londres por Davis y Dutta (2002) abordó el comportamiento de los pasajeros con el propósito de estimar la capacidad en escaleras mecánicas. Utilizando el modelo propuesto por Mayo (1966), se diferenciaron las capacidades entre personas que caminaban a través de la escalera mecánica y aquellas que se mantenían de pie. Este estudio incorporó parámetros como la velocidad de la escalera mecánica, su longitud y el flujo de pasajeros por hora. A través de sus investigaciones, Davis y Dutta (2002) identificaron una relación entre la capacidad de la escalera mecánica y su longitud. Descubrieron que cuanto más larga es la escalera, menos personas están dispuestas a caminar por ella, lo que resulta en una mayor cantidad de pasajeros que permanecen de pie.

El modelo de Davis y Dutta (2002) se basa en las ecuaciones (1) y (2).

$$Ss = v/D \quad (1)$$

$$Cs = Ss * qs \quad (2)$$

Donde:

v , es la velocidad de la escalera mecánica (metros/minuto).

D , es el ancho menor de los peldaños de la escalera mecánica (metros).

Ss , es el número de peldaños pasando por un punto de la escalera mecánica por minuto.

qs , es la proporción de peldaños utilizados al estar de pie dentro de la escalera mecánica.

Cs , el número de pasajeros pasando por un punto de la escalera mecánica por minuto.

Por otra parte, la segunda manera de calcular la capacidad está relacionada con los pasajeros que se desplazan a través del lado izquierdo de las escaleras mecánicas y los que se quedan de pie en el lado derecho de los peldaños. A continuación, se describe el modelo en las Ecuaciones (3), (4) y (5).

$$V = v + u \quad (3)$$

$$Sw = (v + u)/D \quad (4)$$

$$Cw = Sw * qw \quad (5)$$

Donde:

V , es la velocidad efectiva de los pasajeros que caminan por la escalera mecánica (metros/min).

u , es la velocidad de los pasajeros que caminan por la escalera mecánica (metros/minuto).

Sw , es el número de peldaños efectivos pasando por un punto de la escalera mecánica por minuto.

qw , es la proporción de peldaños utilizados al caminar dentro de la escalera mecánica.

Cw , el número de pasajeros pasando por un punto de la escalera mecánica por minuto.

Además, el estudio destacó la influencia del entorno y la ubicación de la escalera en su capacidad total. Por ejemplo, una escalera ubicada en un lugar específico puede reducir su capacidad en 6.9 ppm (pasajeros por minuto), mientras que si se deja un lado de la escalera libre, la reducción es solo de 4.66 ppm.

Es esencial considerar las diferencias culturales y comportamentales entre regiones. En Londres, por ejemplo, es común que las personas se alineen a un lado de la escalera para permitir que otros

pasen (The Telegraph, 2016). En contraste, en Estados Unidos, existe un programa educativo llamado *The safe-T rider programme* que instruye sobre el comportamiento adecuado en escaleras y ascensores (Al-Sharif, 2006).

En cuanto a la seguridad, Al-Sharif (2006) identificó que el comportamiento de los pasajeros es el principal causante de accidentes en escaleras mecánicas. Además, la falta de mantenimiento adecuado puede resultar en fallos mecánicos y lesiones.

En China, se han realizado estudios sobre la evacuación en edificios utilizando escaleras tradicionales, enfocándose en la relación velocidad-densidad. Estos estudios han proporcionado información valiosa sobre el comportamiento de los pasajeros en situaciones de emergencia.

Fruin (1971) es una referencia clave en la gestión de pasajeros, estableciendo criterios para los niveles de servicio en infraestructuras públicas. Lazi *et al.* (2016) utilizaron estos criterios para evaluar la calidad del servicio en escaleras en Singapur. Según el *Highway Capacity Manual* (HCM, 2010), el nivel de servicio (LOS) se define en función de variables como flujo, densidad y velocidad según la siguiente tabla:

Tabla 1. Nivel de servicio para escaleras

| LOS | Espacio (m ² /pasajeros) | Flujo (pasajeros/min/m) | Densidad (pasajeros/m ²) | Velocidad promedio horizontal (m/s) | v/c Ratio |
|-----|--|----------------------------|---|---|--------------|
| A | >1,9 | ≤ 16 | < 0,5 | >0,53 | ≤ 0,33 |
| B | >1,6 - 1,9 | 16 - 23 | 0,5 - 0,7 | >0,53 | >0,30 - 0,41 |
| C | >1,1 - 1,6 | 23 - 33 | 0,7 - 1,1 | >0,48 - 0,53 | >0,41 - 0,53 |
| D | >0,7 - 1,1 | 33 - 43 | 1,1 - 1,4 | >0,42 - 0,48 | >0,53 - 0,73 |
| E | >0,5 - 0,7 | 43 - 56 | 1,4 - 2,5 | >0,40 - 0,42 | >0,73 - 1,00 |
| F | ≤ 0,5 | Variable | > 2,5 | ≤ 0,40 | Variable |

Elaboración propia (Fruin, 1971; HCM, 2010).

Dentro de las innovaciones en el análisis de estaciones de metro, Guo *et al.* (2022) emplearon la biblioteca de visión artificial Yolo para analizar una estación. Sin embargo, en nuestra investigación, consideramos el software de visión artificial *DataFromSky* como una alternativa (Boroiu *et al.* 2022). Esta consideración destaca la importancia de explorar diferentes herramientas y métodos para obtener resultados más precisos y detallados.

Adicionalmente, es fundamental entender que las personas tienen comportamientos diferenciados en una misma estación en función del propósito y hora del día. Según un estudio en el Metro de Santiago, se encontró que la ocupación del tren y el hacinamiento son factores importantes que

afectan la comodidad y seguridad percibida de los pasajeros (Tirachini *et al.*, 2017). Además, la percepción del tiempo en el metro influye en la disposición de los pasajeros (Pineda & Lira, 2019).

La simulación de estaciones de metro es una herramienta valiosa para entender y optimizar el flujo de pasajeros. Hemos modelado y simulado una escalera de estación de metro utilizando el software *AnyLogic*, tomando en cuenta otros estudios como el de López (2016), Wang *et al.* (2015) y Li *et al.* (2014) que utilizan modelos de simulación para analizar y optimizar el flujo de pasajeros en estaciones de metro. Estos modelos de simulación demuestran la flexibilidad y efectividad de estas herramientas para comprender y mejorar el flujo peatonal en estaciones de metro.

El estudio de las escaleras en estaciones de metro es esencial para garantizar la eficiencia, seguridad y comodidad de los pasajeros. La combinación de investigaciones previas, análisis de comportamiento y herramientas de simulación proporciona una base para diseñar y optimizar estas infraestructuras críticas.

3. EXPLORACIÓN EN ESTACIONES DE METRO

El objetivo de esta metodología es identificar y analizar las variables que influyen en el flujo de pasajeros dentro de las escaleras mecánicas. Establecemos que la capacidad de una escalera mecánica está determinada principalmente por tres variables:

- Densidad: Refiere a la cantidad de pasajeros presentes en un espacio determinado de la escalera.
- Flujo: Se refiere al número de pasajeros que transitan por la escalera en un periodo específico.
- Comportamiento de los Pasajeros: Esta es una variable compleja que abarca varios factores. Según estudios previos (Davis y Dutta, 2002; Lazi *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2020), el comportamiento de los pasajeros en las escaleras mecánicas está influenciado por:
 - Longitud de la Escalera: Largo físico de la escalera en metros.
 - Ubicación de los Pasajeros: Si se posicionan a la derecha o izquierda en cada escalón.
 - Acceso a la Escalera: Cómo los pasajeros se aproximan a la escalera, ya sea de frente o desde un costado, y si hay congestión o formación de filas para abordar.
 - Tipos de Pasajeros: Por ejemplo, aquellos con movilidad reducida o sin ella.

Es importante mencionar que, aunque la velocidad de la escalera mecánica puede influir en su capacidad, no la hemos considerado como una variable de análisis. Esto se debe a que su rango típico es de 0,50 a 0,65 m/s (Schindler, 2014), convirtiéndola en una constante que depende de las especificaciones del diseñador del espacio.

Para obtener datos empíricos, realizamos observaciones en terreno durante una semana en diferentes horarios y estaciones del metro de Santiago. Las estaciones seleccionadas para este estudio fueron: Los Dominicos, Manquehue, Tobalaba, Universidad de Chile y Plaza Egaña.

Estas estaciones representan diferentes tipos de estaciones en la red de metro, lo que nos permite obtener una visión más amplia y representativa.

La técnica de recolección de datos consistió en utilizar una cámara de video ubicada estratégicamente para observar y contar el número de pasajeros que ingresan a la escalera mecánica en un intervalo de tiempo determinado. Esta información, expresada en pasajeros por minuto, fue posteriormente procesada utilizando el software de visión artificial *DataFromSky*, que nos permitió obtener métricas más precisas y detalladas sobre el comportamiento y flujo de los pasajeros.

Estación Los Dominicos

Ubicada en el sector oriente de la capital, la estación Los Dominicos sirve como terminal de la Línea 1. Esta estación es un punto de conexión vital para los usuarios, enlazándolos con lugares de trabajo, instituciones educativas, zonas turísticas y centros comerciales. Durante un horario valle (12:00 a 13:00 hrs), se registró un flujo de 22 pasajeros/min, una cifra que se considera baja en comparación con la capacidad máxima de una escalera mecánica, que es de 60 pasajeros/min. La longitud de la escalera fue de 13 m. En cuanto al comportamiento de los pasajeros, el 83% optó por permanecer de pie, mientras que el 17% ascendió caminando. No se detectaron congestiones ni pasajeros con movilidad reducida, estos últimos prefieren los ascensores de la estación. Es relevante mencionar que los pasajeros deben hacer un movimiento en "U" al salir del andén debido a la ubicación de la escalera mecánica cerca de una esquina de la estación.

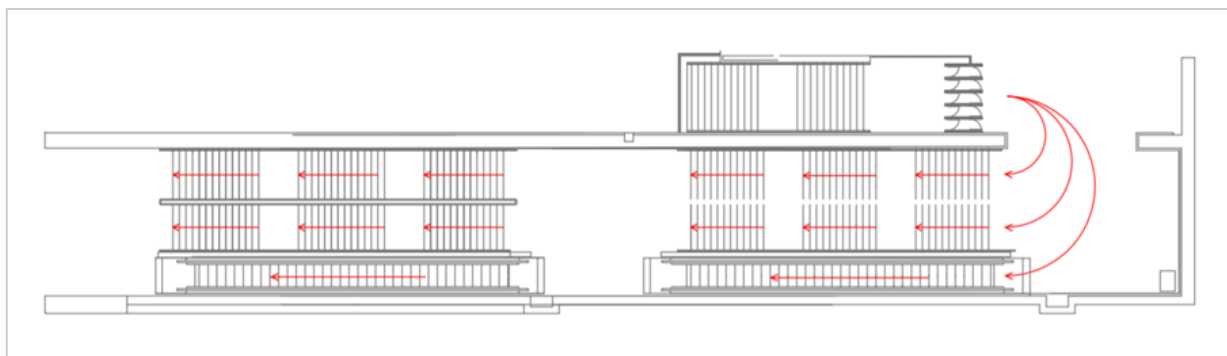


Figura 2 | Esquema de escalera en estación Los Dominicos

Estación Manquehue

La estación Manquehue, situada en un punto neurálgico de la comuna de Las Condes, conecta a los usuarios con diversos lugares de interés. Durante la hora punta de la mañana (8:00 a 9:00 hrs), se registró un flujo de 57 pasajeros/min en la salida hacia calle Rosario Norte. La escalera tenía una longitud de 10 m. Al igual que en Los Dominicos, el 83% de los pasajeros permaneció de pie y el 17% caminó. A pesar de la alta afluencia, los pasajeros se organizaban en dos filas para abordar la escalera, evitando grandes congestiones.



Figura 3 | Escalera mecánica observada en estación Manquehue | Elaboración propia

Estación Tobalaba

La estación Tobalaba es una combinación entre la Línea 4 y la Línea 1, siendo esta última el eje central de la red de metro. Durante la hora punta (8:00 a 9:00 hr.), se observó un flujo de 50 pasajeros/min. La escalera tenía una longitud de 6 m, la más corta del estudio. A pesar de la ausencia de una escalera común, el 83,5% de los pasajeros optó por permanecer de pie y el 16,5% caminó. Se notó una tendencia de intercalación entre los pasajeros al abordar la escalera, posiblemente debido a la alta afluencia.



Figura 4 | Escalera mecánica observada en estación Tobalaba | Elaboración propia

En las tres estaciones estudiadas y presentadas anteriormente los comportamientos observados son similares, como se presenta en la siguiente tabla. No obstante este comportamiento no se manifiesta en todas las estaciones de forma similar como expondremos a continuación.

Tabla 2 | Resumen de características de las estaciones observadas

| Estación | Flujo de Pasajeros/min | Longitud de Escalera (m) | % Pasajeros de Pie | % Pasajeros Caminando |
|---------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-----------------------|
| Los Dominicos | 22 | 13 | 83% | 17% |
| Manquehue | 57 | 10 | 83% | 17% |
| Tobalaba | 50 | 6 | 83.5% | 16.5% |

Elaboración propia

Estación Universidad de Chile

Situada en la región central de Santiago, la estación Universidad de Chile actúa como un nodo intermodal al conectar las líneas L1 y L3 del sistema de metro. Esta estación desempeña un papel crucial en la red de transporte, facilitando el acceso de los ciudadanos a zonas laborales, centros de servicios, instituciones educativas superiores y escuelas. Además, esta escalera de 18 metros de extensión proporciona una entrada directa al principal paseo peatonal de la ciudad. Durante el periodo de punta mañana (8:00 a 8:30 hrs), se observó un tránsito de 37 pasajeros/min, una tasa que, aunque operativa, está por debajo del límite óptimo de una escalera mecánica, establecido en 60 pasajeros/min..

En relación con el comportamiento de los usuarios, el 61% eligió mantenerse estático, mientras que el 39% decidió ascender caminando. Sin embargo, durante el mediodía (13:00 a 13:30 hrs), la dinámica cambió, reduciéndose el flujo a 29 pasajeros/min y sólo el 6,1% optó por caminar al subir. Es interesante notar que la disposición espacial de los usuarios en la escalera también varió: en la mañana, el 81% se alineaba a la derecha, mientras que en la tarde, esta proporción disminuyó al 66%. Esta tendencia a posicionarse a la derecha, dejando libre el carril izquierdo para aquellos que desean avanzar, parece ser una respuesta adaptativa a la densidad y flujo observados.

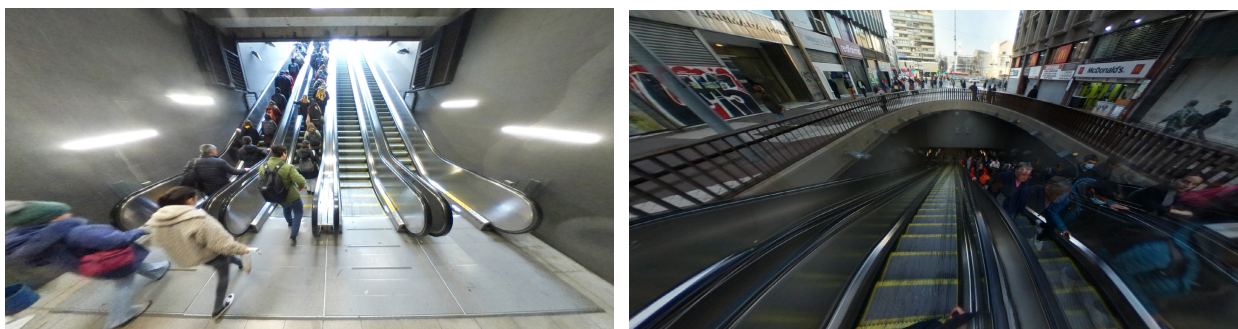


Figura 5 | Estación Universidad de Chile | Escalera de acceso hacia paseo Ahumada | Izquierda vista interior, derecha vista exterior | Elaboración propia

Para analizar en profundidad los flujos, dinámicas y comportamientos de los pasajeros en la escalera se utilizó cámaras y visión artificial con procesamiento de *DataFromSky*, esto se alinea

con métodos utilizados anteriormente en la investigación de Guo *et al.* (2022) donde se utilizó *Yolo*.

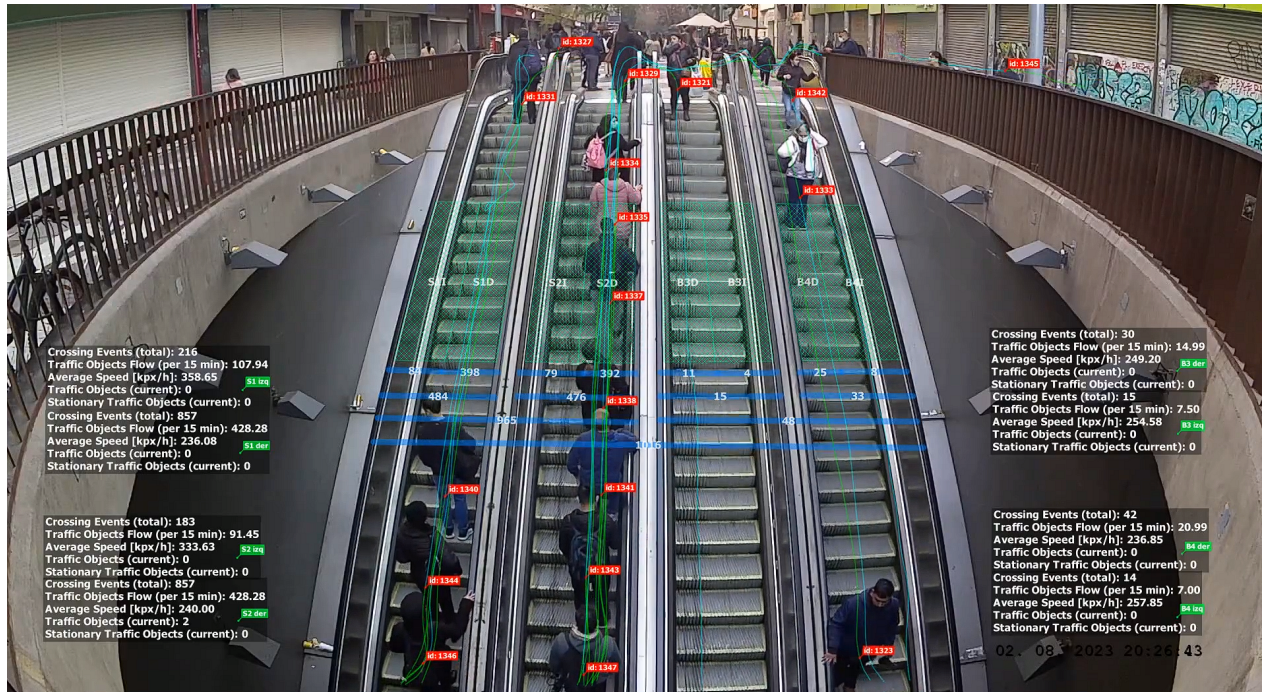


Figura 6 | Acceso Ahumada de la Estación Universidad de Chile | Elaboración propia
Ejemplo de Cámara y proceso en el siguiente link [[Video AM](#) | [Video PM](#)]

Las características de la estaciones anteriormente descritas se resumen en la siguiente tabla

Tabla 3 | Resumen de características de escalera mecánica de estación Universidad de Chile

| Periodo | Flujo de Pasajeros/min | Pasajeros de Pie | Pasajeros Caminando | Pasajeros parados a la derecha |
|--------------|------------------------|------------------|---------------------|--------------------------------|
| Punta Mañana | 37 | 61,2 % | 38,8 % | 81 % |
| Medio día | 29 | 93,9 % | 6,1 % | 66 % |

Elaboración propia

4. SIMULACIÓN DE ESCALERAS MECÁNICAS

Basándonos en el análisis del estado del arte y en los casos previamente evaluados, desarrollamos una herramienta de simulación basada en agentes utilizando el software *Anylogic*. Esta simulación se diseñó para analizar distintos escenarios de configuración de escaleras mecánicas, inspirados en las observaciones realizadas en estaciones de la red de metro de Santiago.

En la simulación, se tomaron en cuenta las principales variables que influyen en la capacidad de las escaleras mecánicas:

- Densidad de pasajeros (pasajeros/m²).
- Flujo de pasajeros (pasajeros/min).
- Comportamiento de los pasajeros.

El comportamiento de los pasajeros se modeló basándonos en investigaciones previas (Davis y Dutta, 2002; Lazi, *et al.*, 2016). Se consideraron aspectos como:

- La longitud de la escalera mecánica (en metros).
- La posición de los pasajeros en la escalera (ya sea a la derecha o izquierda de cada escalón).
- La dirección desde la que los pasajeros se aproximan a la escalera (directamente de frente o desde un lado).

Hemos puesto a disposición el marco de simulación en línea, permitiendo que otros investigadores y estudiantes lo utilicen y exploren. En este se puede aumentar la afluencia de pasajeros de forma dinámica y considerando los escenarios de COVID-19 hemos habilitado la posibilidad de activar distanciamiento social

Framework de Simulación con Anylogic

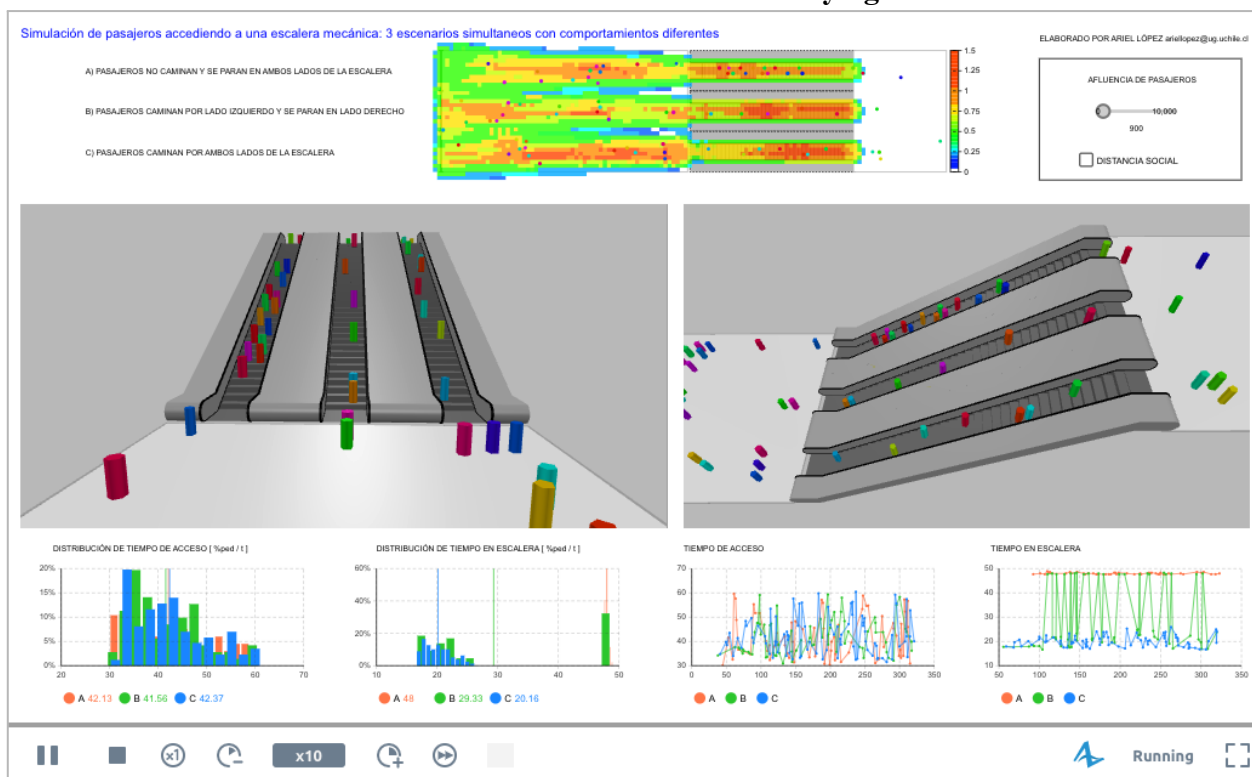


Figura 7 | Framework de simulación de escaleras mecánicas utilizando Anylogic | Elaboración propia se puede correr simulación de forma web en [Anylogic Cloud](https://cloud.anylogic.com/assets/embed?modelId=0dd1138e-0a54-4c35-943d-b7ee3da4f43d)¹

¹ <https://cloud.anylogic.com/assets/embed?modelId=0dd1138e-0a54-4c35-943d-b7ee3da4f43d>

Dentro de la simulación, se establecieron tres escenarios distintos para las escaleras:

- Los pasajeros no caminan y ocupan ambos lados de la escalera.
- Los pasajeros se sitúan de pie en el lado derecho, mientras que otros caminan por el lado izquierdo.
- Los pasajeros caminan por ambos lados de la escalera, replicando una situación de evacuación.

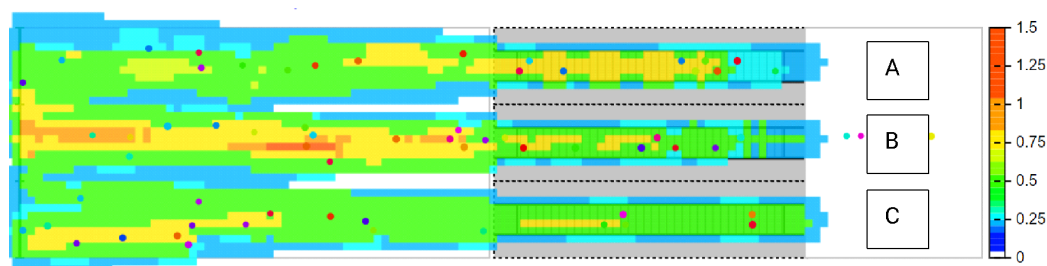


Figura 8 | Densidad en las escaleras mecánicas bajo los escenarios A, B y C | Elaboración propia

Estos tres escenarios se sometieron a pruebas con diferentes afluencias de pasajeros. A partir de ello, se pudo calcular la densidad, el tiempo de espera y el tiempo que los pasajeros pasan en la escalera. Como resultado, se obtuvieron datos sobre la capacidad, densidad y posibles restricciones en el movimiento de los pasajeros.

Tabla 4 | Nivel de servicio cuando los pasajeros se paran en ambos lados (escenario A)

| Número de pasajeros | Densidad máxima [pasajeros/m ²] | Flujo máximo [pasajeros/min] | Velocidad promedio [m/s] | Nivel de servicio (LOS) |
|---------------------|---|------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 339 | 2.15 | 74.53 | 0.45 | F |
| 301 | 2.10 | 71.43 | 0.45 | F |
| 264 | 2.06 | 74.53 | 0.45 | F |
| 226 | 2.03 | 74.53 | 0.45 | F |
| 188 | 2.15 | 77.64 | 0.46 | F |
| 151 | 1.67 | 62.11 | 0.46 | E |
| 113 | 1.85 | 68.32 | 0.46 | E |
| 76 | 1.25 | 52.79 | 0.46 | D |
| 38 | 0.67 | 31.05 | 0.47 | C |

Elaboración propia

Tabla 5 | Nivel de servicio cuando los pasajeros se paran en un lado (escenario B)

| Número de pasajeros | Densidad máxima [pasajeros/m ²] | Flujo máximo [pasajeros/min] | Velocidad promedio [m/s] | Nivel de servicio (LOS) |
|---------------------|---|------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 339 | 1.55 | 80.74 | 0.60 | E |
| 301 | 1.48 | 68.32 | 0.59 | D |
| 264 | 1.48 | 80.74 | 0.61 | D |
| 226 | 1.58 | 74.53 | 0.60 | D |
| 188 | 1.47 | 74.53 | 0.66 | D |
| 151 | 1.34 | 65.22 | 0.60 | D |
| 113 | 1.10 | 55.90 | 0.56 | D |
| 76 | 0.57 | 31.05 | 0.65 | B |
| 38 | 0.51 | 27.95 | 0.65 | A |

Elaboración propia

Los resultados obtenidos en el simulador son coherentes con los datos observados en los casos estudiados.

5. CONCLUSIONES

El comportamiento de los pasajeros en las escaleras mecánicas no solo es una función de factores físicos y operativos, sino que también está profundamente influenciado por condiciones culturales y de entorno. A pesar de estas influencias, es esencial reconocer que las condiciones de flujo de pasajeros, su cantidad y comportamiento, pueden ser cuantificadas y evaluadas en escaleras mecánicas. Esta cuantificación es crucial ya que permite determinar la capacidad real de una escalera en un lugar específico, en lugar de depender únicamente de las especificaciones del fabricante.

A través de una revisión exhaustiva del estado del arte y de observaciones detalladas en escaleras mecánicas del Metro de Santiago, hemos identificado las variables determinantes que influyen en el comportamiento de los pasajeros. Estas variables, que van desde la densidad de pasajeros hasta su disposición a caminar o quedarse de pie según el periodo del día, son esenciales para comprender cómo se utiliza una escalera mecánica en la práctica.

Basándonos en estas variables, hemos desarrollado un marco de simulación que utiliza la simulación basada en agentes, como la proporcionada por *AnyLogic*, para reproducir de manera simplificada, pero precisa, el comportamiento observado. Esta simulación nos ha permitido no solo estimar la capacidad real de una escalera en un lugar determinado, considerando las condiciones culturales y de entorno específicas como son las situaciones de distanciamiento social con COVID-19, sino también evaluar cómo esta capacidad real difiere de la capacidad declarada por el fabricante y la capacidad máxima establecida para su evacuación.

En el método se incorporó el uso de herramientas como *DataFromSky*, en contraste con otras como *Yolo*, esto refleja la diversidad de herramientas disponibles en el campo de la visión artificial, y la necesidad de seleccionar la más adecuada según el contexto y los objetivos de la investigación.

En última instancia, el propósito central de esta investigación es contribuir al estado del arte en el estudio de escaleras mecánicas. Al proporcionar y disponibilizar vía web una herramienta de simulación de uso sencillo, esperamos facilitar a los profesionales y planificadores la tarea de evaluar con precisión la capacidad de las escaleras mecánicas. Esta evaluación precisa es esencial para tomar decisiones informadas sobre el diseño, la operación y la gestión de las escaleras mecánicas en diferentes entornos y contextos.

REFERENCIAS

- Al Widyan, F., Al-Ani, A., Kirchner, N., & Zeibots, M. (2016). A Bottleneck Investigation at Escalator Entry at the Brisbane Central Train Station. *Australasian Transport Research Forum. ATRF*.
- Boroiu, A., Neagu, E. R., & Boroiu, A. (2022). Opportunities to improve road traffic on short-length road connections by correlating intersection traffic lights. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 960(1), 012020.
- Davis, P., & Dutta, G. (2002). Estimation of Capacity of escalators in London Underground. *London School of Economics and Political Sciences*.
- Fruin, J.J. (1971). Designing for pedestrians: A level-of-service concept. *Highw. Res. Rec.* 377, 1–15.
- Guo, Y., & Zhang, W. (2022). Real-time monitoring model of passenger flow congestion of subway station based on improved YOLO v3. *SPIE*.
- HCM (2010). Pedestrian and Bicycle Concept. In Highway Capacity Manual. Transportation Research Board: Washington, DC, USA, Chapter 18.
- Kahali, D., & Rastogi, R. (2021). Passenger Flows at Escalators—Arriving at Count Interval for Design Flow Estimation. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 21(4), 62-80.
- Lara, E. (2019). Oasis urbano: una propuesta de acondicionamiento térmico para el metro de santiago. *Revista Hábitat Sustentable*, 9(2), 16-29.
- Lee, E., Kim, K., Kho, S., & Cho, S. (2022). Exploring for route preferences of subway passengers using smart card and train log data. *Journal of Advanced Transportation*.
- Li, J., Tang, J., & Wang, D. (2019). Dynamic spreading model of passenger group panic considering official guidance information in subway emergencies. *Mathematical Problems in Engineering*.

- Li, Q., Changxu, J., Jia, L., & Qin, Y. (2014). Effect of height on pedestrian route choice between stairs and escalator. *Discrete Dynamics in Nature and Society*.
- López, A. (2016). Optimización del diseño de Estaciones de Metro. *Actas del XIX Congreso Latinoamericano de Transporte Público y Urbano CLATPU 2016*.
- Mayo, A. (1966). A study of escalators and associated flow systems. *Imperial College of Science and Technology*.
- Metro de Santiago (2018). Reporte de sostenibilidad.
- Metro de Santiago (2019). Memoria Anual.
- MoovitApp (2019). Datos y estadísticas de uso del transporte público en Santiago, Chile.
- Schindler (2014). Catálogo Schindler 9300AE.
- Seriani, S., & Fernandez, R. (2015). Pedestrian traffic management of boarding and alighting in metro stations. *Transportation research part C: emerging technologies*, 53, 76-92.
- Su, G., Si, B., Zhi, K., & Li, H. (2022). A calculation method of passenger flow distribution in large-scale subway network based on passenger–train matching probability. *Entropy*, 24(8), 1026.
- The Guardian (2019). I wonder if I've saved a woman from suicide': my job on the London Underground.
- Vecchio, G. (2021). Estaciones como nodos y lugares: el potencial del tren para el desarrollo urbano orientado al transporte en Santiago, Chile. *Revista Urbano*, 24(43), 84-95.
- Wang, H., Wang, B., Xu, J., & Hu, Z. (2018). Analysis and optimization of passenger flowlines at zhongchuan high-speed railway station. *Modelling and Simulation in Engineering*.
- Wang, W., Lo, S., Liu, S., & Ma, J. (2015). On the use of a pedestrian simulation model with natural behavior representation in metro stations. *Procedia Computer Science*, 52, 137-144.
- Wei, Z., Chu, S., Huang, Z., Qiu, S., & Zhao, Q. (2020). Optimization design of x-ray conveyer belt length for subway security check systems in Beijing, China. *Sustainability*, 12(5), 2133.