



UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

[Propuesta de un modelo de simulación de flujo de usuarios basado en la transmisión de celdas hexagonales en cuellos de botella en la plataforma de embarque. Caso: Estación Angamos de la línea 1 del metro de Lima]

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Principe Sifuentes, Alexander Aldair (0000-0002-9003-7899)

Chipana Mattos, Hyderf Bruno (0000-0002-0174-7945)

ASESOR

Castro Aragón, Fernando Ramiro (0000-0001-7638-5961)

Lima, [29 de agosto del 2022]

DEDICATORIA

[Dedicado a mi madre que siempre creyó en mis capacidades y a Dios por darme un día más de vida. A mí mismo por ser constante en luchar y lograr mis objetivos. También a mis amigos que confiaron en mí y a mi familia.]

-Alexander Principe

[Dedicado a Walter gran amigo compañero, que desde el cielo me guía en mis más grandes éxitos.]

-Hyderf Chipana

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se debe a constante esfuerzo y dedicación por ser mejores profesionales. Además, agradecemos a nuestro asesor Fernando Castro a quien debemos el desarrollo y aprendizaje en estos meses. A Dios por guardarnos y darnos un día más de vida.

RESUMEN

La preocupación en la actualidad es la evacuación de pasajeros ante un evento de emergencia, es por ello que se realiza diferentes estudios de simulación peatonal. El modelo de transmisión celular simulará el comportamiento del flujo de los usuarios dentro de los espacios de la plataforma de embarque de la estación Angamos de la línea uno del metro de Lima, con la finalidad de obtener datos de tiempo de evacuación para que el modelo sea utilizado en futuras investigaciones.

En el primer capítulo se encontrará el problema de evacuación en las plataformas de embarque, además con algunos antecedentes en otros países. Así mismo, la hipótesis y los objetivos de la investigación. En el segundo capítulo se desarrolló el marco teórico que respalda la investigación de la simulación del flujo de pasajeros. En el tercer capítulo se describe la metodología a seguir para el desarrollo del modelo, desde la obtención de datos hasta la validación.

En el cuarto capítulo se realizó el estudio de la problemática, en este apartado se puede encontrar los diferentes tipos modelos de simulación peatonal y por qué el modelo de transmisión de celdas se adapta mejor al escenario estudiado.

En el quinto capítulo se basó en el desarrollo propio del modelo, donde se realizó la recolección de la data, preparación de los parámetros y el desarrollo del modelo.

En el sexto capítulo se optó por los análisis de los resultados obtenidos en el desarrollo del modelo. Así mismo, la validación mediante el software Statkey que arrojó un grado de confiabilidad de 95%.

Palabras clave: [Modelo de transmisión celdas; cuello de botella; simulación; flujo peatonal; plataforma peatonal; evacuación]

ABSTRACT

[The current concern is the evacuation of passengers in an emergency event, which is why different pedestrian simulation studies are carried out. The cellular transmission model will simulate the behavior of the flow of users within the spaces of the boarding platform of the Angamos station of line one of the Lima metro, in order to obtain evacuation time data so that the model is used in future research.

In the first chapter, the problem of evacuation in the boarding platforms will be found, in addition to some antecedents in other countries. Likewise, the hypothesis and the objectives of the investigation. In the second chapter, the theoretical framework that supports the investigation of the simulation of the flow of passengers was developed. The third chapter describes the methodology to be followed for the development of the model, from data collection to validation.

In the fourth chapter, the study of the problem was carried out, in this section you can find the different types of pedestrian simulation models and why the cell transmission model is better adapted to the studied scenario.

In the fifth chapter, it was based on the own development of the model, where the data collection, preparation of the parameters and the development of the model were carried out.

In the sixth chapter we opted for the analysis of the results obtained in the development of the model. Likewise, the validation using the Statkey software that yielded a degree of reliability of 95%.]

Keywords: [Cell transmission model; bottleneck; simulation; pedestrian flow; pedestrian platform; agglomeration]

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	ESTADO DEL ARTE	3
1.2	HIPÓTESIS Y/O OBJETIVOS	7
1.2.1	HIPÓTESIS.....	7
1.2.2	OBJETIVO GENERAL	7
1.2.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
2	MARCO TEÓRICO	8
3	METODOLOGÍA.....	12
3.1	ETAPAS	12
3.1.1	DESARROLLO DE ETAPAS.....	12
4	ESTUDIO DE LA PROBLEMÁTICA	16
4.1	RECONOCIMIENTO DE TÉCNICAS EXISTENTES	16
4.1.1	CELL TRANSMISSION MODEL.....	16
4.1.2	ALGORITMO CINÉTICO MONTE KARLO (KMC)	17
4.1.3	NOMAD Y SIMPED (MÉTODO DE SIMULACIÓN DE PEATONES).....	19
4.1.4	COMPARACIÓN DE MÉTODOS EXISTENTES	20
4.2	ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE TRASMISIÓN DE CELDAS	21
4.2.1	CELDA HEXAGONALES EN UN TRAMO BIDIRECCIONAL.....	21
4.2.2	CELDA HEXAGONALES EN ÁREAS REDUCIDAS	23
5	DESARROLLO DEL MODELO	24
5.1	DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	24
5.1.1	DATOS OBTENIDOS DEL ÁREA DE ESTUDIO	24
5.1.2	DEMANDA PEATONAL EN LA PLATAFORMA.....	26
5.1.3	ANÁLISIS DE DEMANDA EN LA PLATAFORMA.....	28
5.1.4	CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LA ESTACIÓN	30

5.2	DESARROLLO DEL MODELO.....	33
5.2.1	<i>PREPARACIÓN DE PARÁMETROS DE SIMULACIÓN</i>	35
5.2.1.1	Consideraciones.....	37
5.2.2	<i>ESCENARIO GEOMÉTRICO DEL ÁREA DE ESTUDIO</i>	39
5.2.3	<i>DESARROLLO</i>	41
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	46
6.1	VALIDACIÓN.....	49
7	CONCLUSIONES.....	56
8	RECOMENDACIONES	58
9	REFERENCIAS	59
10	ANEXOS.....	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	31
<i>Datos geométricos de celdas hexagonales prepandemia y pandemia</i>	<i>31</i>
Tabla 2	31
<i>Parámetros iniciales para el cálculo del número máximo de peatones que pasan por una abertura en situación pandemia y prepandemia</i>	<i>31</i>
Tabla 3	32
<i>Parámetros iniciales para el cálculo de la capacidad máxima de peatones por celda en situación pandemia y prepandemia</i>	<i>32</i>
Tabla 4	43
<i>Datos iniciales para el desarrollo del modelo</i>	<i>43</i>
Tabla 5	43
<i>Tiempo que un usuario se demora en desembarcar de un vagón del tren</i>	<i>43</i>
Tabla 6	46
<i>Tiempos totales de desembarque en las puertas considerando la variación de personas con un tiempo de disipación al cruzar la puerta 1 y 4 con referencia del año 2020</i>	<i>46</i>
Tabla 7	47
<i>Tiempos totales de desembarque en las puertas considerando la variación de personas con un tiempo de disipación al cruzar la puerta 2 y 3 con referencia del año 2020</i>	<i>47</i>
Tabla 8	48

<i>Tiempos totales de desembarque en las puertas considerando la variación de personas con un tiempo de disipación al cruzar la puerta 1 y 4 con referencia del año 2019.....</i>	48
Tabla 9.....	48
<i>Tiempos totales de desembarque en las puertas considerando la variación de personas con un tiempo de disipación al cruzar la puerta 2 y 3 con referencia del año 2019.....</i>	48
Tabla 10.....	50
<i>Datos tomados en campo de los tiempos promedios que dura un ciclo de embarque.....</i>	50
Tabla 11.....	50
<i>Datos iniciales de las puertas 1 y 4.....</i>	50
Tabla 12.....	51
<i>Desarrollo del modelo con los tiempos que se demora en embarque en las puertas 1 y 4.</i>	51
Tabla 13.....	51
<i>Datos iniciales de las puertas 2 y 3.....</i>	51
Tabla 14.....	51
<i>Desarrollo del modelo con los tiempos que se demora en embarque en las puertas 2 y 3.</i>	51
Tabla 15.....	52
<i>Datos iniciales de las puertas 1 y 4.....</i>	52
Tabla 16.....	52
<i>Desarrollo del modelo con los tiempos que se demora en embarque en las puertas 1 y 4.</i>	52
Tabla 17.....	52
<i>Datos iniciales de las puertas 2 y 3.....</i>	52

Tabla 18.....	52
<i>Desarrollo del modelo con los tiempos que se demora en embarque en las puertas 2 y 3.</i>	52
Tabla 19 <i>Tiempos tomados en campo</i>	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas para el desarrollo de la investigación. Elaboración propia.....	12
Figura 2. Celda i y sus 6 celdas vecinas. Adaptado de Simulation of bi-directional pedestrian flow through a bottleneck: Cell transmission model, por Li y Guo, 2020.	14
Figura 3. Cálculo de número de peatones bajo demanda. Adaptado de <i>Agent-based Pedestrian Cell Transmission Model for Evacuation</i> , por Tak Kim y Yeo, 2017.	15
Figura 4. Modelos de CTM según su forma y grados de libertad. Elaboración propia.	17
Figura 5: Configuración de un área cuadrada con un flujo bidireccional con aumento de tiempo y densidad. Adaptado de Simulations of bi-direction pedestrian flow using kinetic Monte Carlo methods, por Sun, Y, 2019.....	18
Figura 6: Celdas hexagonales distribuidas en la plataforma de embarque y desembarque. Elaboración propia.....	22
Figura 7: Plano de detalle del segundo nivel de la estación Angamos de la Línea 1 del metro de Lima. Adaptado de Expediente técnico final-Volumen N°3: Planos. Estación Angamos-Área de pasajeros, por la ATU, 2010.	24
Figura 8: Dimensiones de las puertas del tren Alstom Metrópolis 9000. Elaboración propia.	25
Figura 9: Longitud del tren español modelo Alstom Metrópolis 9000. Elaboración propia.	25
Figura 10: Dimensiones de la plataforma de embarque. Elaboración propia.....	25
Figura 11: Demanda máxima promedio en día hábil 2019. Elaboración propia.	26
Figura 12: Demanda máxima promedio en hora pico en el 2019, prepandemia. Elaboración propia.....	27
Figura 13: Demanda máxima en un día hábil año 2020. **Marzo, inicio de pandemia. Elaboración propia.....	28

Figura 14: Demanda máxima promedio en hora pico en inicio de pandemia 2020. Elaboración propia.....	29
Figura 15: Frecuencia de pasajeros en hora punta en día laborable. Pandemia marzo 2020. Elaboración propia.....	30
Figura 16: Dimensiones geométricas de celda hexagonal. Elaboración propia.	30
Figura 17: Adaptación de celdas hexagonales en toda la plataforma, en embarque y desembarque. Elaboración propia.....	33
Figura 18: Identificación del espesor de puerta en el diseño. Elaboración propia.	34
Figura 19: Flujograma del proceso de desarrollo del modelo CTM. Elaboración propia. ..	38
Figura 20: Espacio geométrico definido con potenciales de celdas en el área del andén y el área del vagón. Elaboración propia.	41
Figura 21: Identificación de letras en cada celda. Elaboración propia.....	42
Figura 22: Identificación de letras en cada celda. Elaboración propia.....	42
Figura 23: Resultados de confiabilidad en statkey. Elaboración propia.	55

1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día uno de los temas fundamentales de la ingeniería civil, es la evacuación correcta de las personas ante cualquier evento. Se trata de todo tipo de edificios, desde pequeñas viviendas unifamiliares hasta grandes edificios públicos como colegios o centros comerciales, así como diferentes áreas públicas de carácter parcialmente abierto, como estadios, parques, embarques, estaciones de trenes, etc. (Gwizdalla, 2015). Así mismo, hoy en día se han realizado diversos estudios con diferentes enfoques para estudiar el proceso de evacuación, desde los orientados físicamente, basados en el modelo de analogía de flujo de masas hasta los modelos que intentan reflejar la psicología del comportamiento humano (Li, Zhang, Song & Yuen, 2020). Por ende, entre los mecanismos de toma de decisiones individuales y el realismo de los modelos de evacuación en aglomeraciones es tema crucial de los modelos de simulación.

El tráfico de peatones todavía juega un papel importante en el sistema de transporte urbano. De acuerdo con Li & Guo (2020), la condición geográfica y la construcción de carreteras, hay muchos cuellos de botella en el tráfico peatonal real, como las puertas del metro y el tren, las entradas de centros comerciales, escaleras y puentes. La existencia de cuellos de botella es una de las razones más importantes del declive de la eficiencia del tráfico peatonal (Li & Guo, 2020). También es fácil provocar atascos y estampidas, debido a que restringen el flujo y el movimiento peatonal.

Por otro lado, el impacto de la anchura, la longitud, la forma y la ubicación del cuello de botella en el flujo de peatones y la capacidad del tráfico se ha estudiado ampliamente (Rupprecht, Klingsch & Seyfried, 2011). Además, se percibió que la motivación de movimiento de los peatones muestra influencia en el flujo de cuello de botella. La distribución de la densidad ante un cuello de botella de los estudiantes jóvenes con baja motivación se observa diferente de la de los mayores de baja motivación y la de los niños de

alta motivación (Garcimartín, Pastor, Martín-Gómez, Parisi & Zuriguel, 2017). Aún no se sabe cuál es el ancho efectivo de un cuello de botella para garantizar la eficiencia de la evacuación (Li, Zhang, Song & Yuen, 2020). Por ende, la falta de comprensión de las características del movimiento de los peatones en situaciones de emergencia aumenta las dificultades en el manejo de multitudes.

Es por esta razón que existe en la actualidad, distintos métodos de estudiar y medir el movimiento de peatones, y que de esta forma se puedan proponer soluciones ante posibles aglomeraciones que son fuentes de peligro para los usuarios. Siendo la simulación de peatones la que mejor se adapta ya que, utilizando características físicas del lugar de estudio proporcionan gran semejanza con la realidad vista en campo.

Dentro de estos métodos se encuentran la simulación a través de software, los cuales en su mayoría demuestran de forma gráfica el comportamiento de peatones en un área determinada, el cual está basado en conceptos de aleatoriedad de movimiento, lo que hace que los programas estén destinados a conocer como los usuarios actúan ante un diseño específico de áreas urbanas (Teknomo, 2002). Es por ello por lo que se debe utilizar un método de simulación más eficiente en una situación de evacuación, método el cual con parámetros ajustables pueda ser utilizado en distintos escenarios.

Así mismo para darle solución a esta problemática y pueda ayudar a futuras investigaciones enfocadas a simular la problemática planteada, la presente investigación seleccionó un escenario de constante evacuación como lo es un embarque de tren de sistema de transporte público en hora punta. Este escenario será utilizado para proponer un modelo de simulación utilizando celdas hexagonales y el método de Celular Transmission Modeling (CTM), para obtener una gráfica de movimiento peatonal que varíe en distintos tiempos. Método el cual será validado al compararse con tiempos reales tomados de manera presencial en el escenario de estudio.

1.1 ESTADO DEL ARTE

En este trabajo se ha revisado diversas fuentes bibliográficas se muestra su desarrollo continuación para el mejor entendimiento del tema y problemática a resolver.

En principio, es importante entender como la aglomeración de peatones juega un rol importante para determinar el flujo de transporte y la interacción que existe entre ellos y como estos generan tráfico en cuellos de botella ocasionando diversos accidentes algunos fatales, como la muerte. A pesar de la obvia preocupación (la asfixia debida a la compresión pulmonar es una de las principales causas de muerte en desastres de multitudes), las investigaciones en las que se produce un estrés de contacto sostenido entre los peatones son escasas (Garcimantin, Pastor, Gómez, Parisi & Zuriguel, 2017). Además, cabe precisar que la motivación de los peatones al momento de trasladarse es un factor de suma importancia, puesto que Li & Guo (2020); Li, Zhang, Song, y Yuen, (2020), tomaron el comportamiento de motivación entre los peatones en el modelo de trasmisión de celdas como un conjunto de parámetros.

Estudios previos demuestran que los peatones tienden a seguir a los que van en la misma dirección al caminar, al igual que la colonia de hormigas sigue los rastros químicos dejados por los anteriores. A medida que los peatones evitan chocar entre sí, los peatones de la derecha (izquierda) siguen a los peatones de la parte delantera derecha (izquierda), observados en el experimento (Luo, Liu, Fu, Ma & Liu, 2020).

Para poder subir antes y ocupar un asiento libre, algunos pasajeros que abordan pueden no seguir la regla general "bajar primero y embarcar segundo" en el proceso real de embarque y desembarque. Empiezan a subir, antes de que bajen todos los pasajeros. Entonces, en esta parte, consideran a la situación en la que los peatones en las regiones izquierda y derecha se mueven al mismo tiempo (Li et al., 2020).

Por otro lado, la geometría típica en un edificio, el cuello de botella restringe la libertad de movimiento y flujos de los peatones. Comprender las propiedades y los patrones de movimiento de multitudes tanto para los peatones normales como para la evacuación es esencial para diseñar la infraestructura pública y el edificio con un alto nivel de seguridad y facilidad de servicio (Tak, Kim & Yeo, 2018). Tal como lo menciona Li et al., (2020), que la anchura, la longitud, la forma y la ubicación del cuello de botella en el flujo peatonal y la capacidad pueden provocar atascos y estampidas. Así mismo, al analizar los efectos de diferentes anchos de cuello de botella, se puede obtener la conclusión de que el flujo de peatones aumenta linealmente a medida que aumenta el ancho del cuello de botella (Li et al., 2020).

Según Li et al., (2020), investigan las características del flujo peatonal bidireccional a través de cuellos de botella con diferentes anchos. Sin pérdida de generalidad, este modelo simula el proceso de embarque y desembarque de pasajeros para un escenario específico, es decir, el área de la plataforma del tren o metro. Además, toman el comportamiento de humildad entre los peatones en el modelo como un conjunto de parámetros. Pueden reflejar bien la espontaneidad y el comportamiento de evitación de los peatones en el proceso de evacuación.

El modelo de transmisión de celdas extendida, propuesta por Li & Guo (2020), con representación de celda hexagonal regular para simular el flujo de peatones bidireccional a través de un cuello de botella. Li y Guo (2020), Li et al (2017), tomaron el comportamiento de motivación entre los peatones en el modelo como un conjunto de parámetros. Así mismo, analizar las características de movimiento de peatones con alta y baja motivación que atraviesan cuellos de botella con diferentes anchos para tener una base de datos sólida de variables que pueden influir en el modelo (Li et al, 2017). Un modelo de transmisión simula

el proceso de embarque y desembarque de pasajeros para un escenario específico, es decir, el área de la plataforma del tren o metro (Li & Guo, 2020).

El propósito de este estudio es desarrollar un modelo macroscópico de simulación de peatones para una situación de aglomeración en embarque y desembarque. El requisito principal para tal modelo de simulación de evacuación es entender la esencia de la dinámica de los comportamientos de selección y bidireccional con un enfoque macroscópico.

Los modelos que analizan estos comportamientos son macroscópicos o microscópicos. Según Xu y Guo (2018), el primero generalmente se aplica a una gran multitud e implica tratar a la multitud como un todo o como un fluido, en forma de ecuaciones diferenciales parciales para formular la ley de conservación del flujo. Sin embargo, esta clase de modelos a menudo simplifica demasiado la complejidad inherente del mundo real. Este último es más exquisito al describir a los peatones y cada peatón es tratado individualmente. Sin embargo, esta clase de modelos se limita a simular movimientos de peatones de escalas pequeñas o medias debido a la ineficacia de los cálculos.

En comparación con el modelo macroscópico, según Li y Guo (2018) el modelo microscópico puede proporcionar una predicción más precisa e información detallada sobre la evacuación de peatones. Sin embargo, el modelo microscópico no es adecuado para simulaciones en grandes instalaciones peatonales con un diseño de espacio complejo. Esto se debe a que, para tales instalaciones, el modelo microscópico requiere más tiempo de cálculo y es más probable que se bloquee en la simulación de evacuación de peatones. Por lo tanto, el modelo microscópico no puede caracterizar completamente el comportamiento al caminar de los peatones.

Se empleó un modelo macroscópico, con el fin de hacer coincidir el nivel de detalles con el propósito de este estudio, que es analizar la dinámica en los movimientos de la aglomeración que se produce en las estaciones sobre todo en el embarque y desembarque. Sin embargo,

como se mencionó anteriormente, el problema común de los modelos macroscópicos es la falta de consideración del comportamiento de evacuación, como la selección de salida y la redirección. Para complementar esa debilidad, se incorporó el concepto de agentes usado por Zhang, Su y Zhang (2017), que los usuarios, en este caso peatones, pueden tomar decisiones sobre sus destinos y direcciones de viaje en cada paso de 3 tiempos, en el modelo macroscópico con preocupaciones minimizadas sobre las interacciones entre agentes individuales (Zhang et al., 2017).

Las diferencias entre el modelo realizado por Tak et al., (2017) sobre el modelo de transmisión de celdas original con flujo unidireccional modificado fue diseñado para transmitir una celda hacia otras ocho más en direcciones diferentes. Tales como los movimientos multidireccionales, ya que estos causaron conflictos dentro de una celda, resultando en reducción de la capacidad de celda en conflicto, por lo que procedió a una reducción de movimientos. Así mismo, el modelo presentado por Li y Guo (2018) se basó en determinar el comportamiento de elección de la ruta de cada peatón. Además, de diseñar un modelo hexagonal e isotrópica, en la que las propiedades de cada celda se pueden definir iguales o similares. A diferencia del modelo planteado por Tak et al., (2017), este modelo de celdas hexagonal reduce los conflictos que existen en los movimientos de cada peatón. Por consiguiente, en este trabajo se procedió a realizar la investigación con el modelo empleado por Li y Guo (2018).

Por otro lado, cabe mencionar que se utilizó el modelo bidireccional, debido a que se debe a la mejor coordinación entre personas que se encuentran en direcciones opuestas. Por el contrario, como lo explica Xu y Guo, (2018) los peatones no pueden reaccionar entre sí lo suficiente en un flujo unidireccional, lo que conduce a un rendimiento relativamente menor, puesto que las interacciones entre los contraflujos se pueden describir por la capacidad efectiva de los flujos asociados bajo varios índices de demanda en un nivel macro. Además,

se destacan tres preferencias para caminar, que incluyen caminar en el lado derecho, seguir a los que van delante en la misma dirección y evitar conflictos con los que están en la dirección opuesta.

1.2 HIPÓTESIS Y/O OBJETIVOS

1.2.1 HIPÓTESIS

El modelo de flujo de pasajeros planteado simula la evacuación en dos direcciones de los usuarios en el escenario específico de plataforma de embarque, obteniendo resultados en un rango mínimo de 95% de confiabilidad en comparación a los tiempos recolectados en campo.

1.2.2 OBJETIVO GENERAL

Proponer un modelo de simulación peatonal en una plataforma de embarque, haciendo uso de una combinación de los conceptos de celdas hexagonales con transmisión celular y evacuación constante.

1.2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Reconocer las técnicas existentes que intentan resolver el problema de la simulación en escenarios de evacuación como las plataformas de embarque y desembarque.
- ✓ Analizar y determinar los modelos de transmisión de celdas existentes que pueden ser aplicados en un escenario específico, línea 1 del metro de Lima.
- ✓ Analizar los resultados obtenidos con la técnica propuesta y validar el modelo propuesto.

2 MARCO TEÓRICO

Los cuellos de botella surgen en situaciones de aglomeración de personas, estos escenarios no son premeditados puesto que se dan por distintas razones como pueden ser emergencias de evacuación o eventos de gran multitud. Se generan debido al flujo constante que atraviesa una entrada o salida no diseñada para grandes masas. Durante estos eventos, el factor de las dimensiones de la entrada o salida puede influir de gran manera el tiempo que tarda en disolverse por completo (Li et al., 2020).

En estas situaciones de emergencia los accidentes son muy probables ya que los usuarios que atraviesan no mantienen un comportamiento habitual. Además, todos ellos tienen como prioridad atravesar el cuello de botella sin importarles la situación de sus iguales alrededor (Henderson, 1974). Por ello, han existido muchas investigaciones tratando de simular estos escenarios con la finalidad de corregirlos, mejorarlos, eliminarlos o incluso prevenirlos. En noviembre del 2018, Li & Guo propusieron un modelo de transmisión de celdas hexagonales capaces de simular un cuello de botella de entrada y salida con parámetros de comportamiento peatonal, de esta manera, limitar los movimientos de las personas hacia una sola dirección, lo cual sigue la realidad donde los usuarios no contemplan la idea de regresar en la dirección de llegada.

El modelo de transmisión de celdas es un modelo de simulación para el comportamiento de un grupo de estudio, el cual consiste en que cada usuario se representa sobre una tabla como una figura geométrica, la cual tiene contacto con otras celdas de las mismas dimensiones e interactúan de manera aleatoria con movimientos los cuales se restringen de acuerdo con el modelo de estudio (Gwizdalla, 2015).

Para el escenario que se plantea en la investigación, el cuello de botella se encuentra en el área de embarque y desembarque de las líneas del tren en la ciudad de Lima, un escenario donde no es una emergencia, pero sí los usuarios mantienen un comportamiento de

competitividad para atravesar el cuello de botella, esta idea como base permite al modelo de simulación considerar restricciones distintas a una evacuación. En el caso de un escenario competitivo, los usuarios optan por movimientos laterales para encontrar espacios vacíos por los que atravesar la entrada o salida del cuello de botella, lo que es distinto a un escenario de emergencia y/o evacuación donde los peatones no cambian su dirección frontal sin reparo (Garcimartín et al, 2017). Así también, la situación estudiada comprende dos direcciones de flujos peatonales por las que atraviesa el cuello de botella, en la cual los usuarios buscan tanto entrar como salir de los vagones del tren antes que el tiempo límite que las puertas se mantienen abiertas termine. Para este caso el estudio supone un piso con flujos peatonales constantes y opuestos que encuentran interrupción con el otro formando un cuello de botella en las zonas de embarque y desembarque del tren. Para un estudio en múltiples direcciones se considera la idea de que los flujos peatonales opuestos forman de manera inconsciente carriles de preferencia que apoyan a ambas direcciones a seguir sin hacer contacto con sus contrapartes (Luo et al, 2020).

Investigaciones previas han considerado distintos métodos de evaluación para cuellos de botella puesto que, en un estado de emergencia, estos eventos pueden causar tantos heridos como el mismo siniestro. De esta manera, Gwizdalla (2015) plantea un modelo de automatización celular para evaluar el comportamiento de los transeúntes en una situación de evacuación. Sin embargo, no considera una doble dirección ya que los usuarios solo buscan salir del perímetro en evacuación.

Para considerar las dimensiones de las celdas geométricas que darán lugar a modelar personas que atraviesan un cuello de botella en dos direcciones, se debe considerar los anchos que presenta cada persona según la intención que tiene cuando están en camino. Pero al instante del encuentro en una zona estrecha de cuello de botella, estas dimensiones como

el ancho disminuyen hasta un mínimo. Así que se considerará un promedio de 37 centímetros que simboliza la distancia de hombro a hombro (Garcimantín et al, 2017)

Existen muchos otros enfoques como microscópicos o mesoscópicos. Un artículo de Xu y Guo en 2018, indican que las para modelos bidireccionales en un enfoque mesoscópico guiado hacia el comportamiento de los peatones, las personas son capaces de implementar carriles de preferencia con la finalidad de evitar un cruce con otras personas, es por eso que en carriles que suelen ser el derecho, las velocidades predominantes son las de la persona delante en la misma dirección, por lo que los primeros peatones en cruzar el área bidireccional son el factor condicional de la densidad del flujo.

El procedimiento del modelo de transmisión de celdas del presente proyecto tomará de guía el modelo de Li y Guo, puesto que es bidireccional provocando un cuello de botella al medio del área de estudio. Además, propone soluciones específicas para aminorar la densidad peatonal y modela soluciones que ya existen para medir su nivel de eficacia. Por último, esta investigación formula fenómenos de auto organización que se ven en masas de personas, entre ellas se encuentran el comportamiento de seguimiento y evitación, el derrame, la disipación y la formación de carriles. (Li & Guo, 2020)

Una plataforma de embarque y desembarque posee un funcionamiento secuencial, el cual consiste primero en la aglomeración de personas en el área dentro de la estación. Segundo, el desplazamiento de los peatones hacia adentro y hacia afuera del vagón del tren. Tercero, el reordenamiento de los usuarios en el área de embarque y desembarque. Este proceso es constante y repetitivo durante las horas que la línea está operativa. (Dubroca, Kabalan & Leurent, 2019). Por lo tanto, entender su funcionamiento sirve como base teórica del estudio presente, el cual debe enfrentar la problemática de la aglomeración descontrolada en esas zonas y simular estos los cambios que aporten a cada uno de los pasos. También, el diseño de la estación del tren en su arquitectura y distribución de espacios juega un papel

importante, debido a que influye en los movimientos de los peatones durante el primero de los procesos que conforma el funcionamiento de la plataforma de embarque. Durante la llegada de nuevos peatones, los accesos pueden ser favorables o desfavorables según su diseño lo dicte. Así también, las dimensiones y forma de la plataforma controlan como serán posicionados los peatones que se encuentren dentro.

Otro factor importante son las señalizaciones dentro de la estación del tren debido a que influyen directamente al último de los procesos ya que, durante el reordenamiento de personas, se da a cabo un conflicto entre los usuarios que saldrán de la estación, los usuarios que entran y los que se movilizan dentro de la plataforma en espera del siguiente tren. Siendo las señalizaciones los únicos estímulos visuales que apoyan al usuario explicando donde y como movilizarse. De esta manera, se considera que los factores de distribución y señalización serán las variables durante la simulación a través del flujo peatonal, para luego proponer mejoras en ambos aspectos que reducirán la aglomeración.

3 METODOLOGÍA

3.1 ETAPAS

El marco teórico permitirá sustentar el desarrollo de esta investigación, pero para una mejor comprensión y entendimiento del trabajo toma como referencia la metodología para el estudio de peatones propuesta por Taeknomo (Ver Anexo 1). La metodología para implementar se dividirá en 5 etapas. (Ver figura 1).



Figura 1. Etapas para el desarrollo de la investigación. Elaboración propia.

3.1.1 DESARROLLO DE ETAPAS

La primera etapa consiste en adquirir conocimientos e información de temas, métodos, y soluciones acerca de la problemática (simulación más precisa del flujo de pasajeros en la plataforma de embarque y desembarque). En la segunda etapa se analizó los métodos del

modelo de transmisión de celdas, el método bidireccional en la interacción peatón-peatón y se centrará en un enfoque macroscópico.

La tercera etapa consistió en extraer datos de campo del caso de estudio, la estación Angamos de la línea 1 del metro de Lima, el cual se realizó de manera manual mediante conteo de aquellas personas que se encuentran en la plataforma y de manera digital mediante solicitud de información en mesa de partes de la Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao (ATU). Cabe recalcar que estos datos brindaron el número de peatones que se aglomeran en el uso de las plataformas de embarque y desembarque del caso en cuestión debido al conflicto de cuello de botella. Se opta por este medio de recolección de datos debido que permitió identificar la hora punta y obtener resultados reales y más eficientes para el estudio, que posteriormente sirvió como base para la simulación.

En la cuarta etapa, se analizó el modelo de transmisión de celdas con los datos obtenidos anteriormente. Así mismo, se comprobó que el modelo propuesto logra la simulación de la aglomeración de los usuarios de la problemática planteada. También se verificó que el modelo planteado se asemeje a la realidad, lo cual se comprobó con validación estadística.

El diseño de investigación tiene que ver con la recolección de datos de campo, además experimentalmente se analizaron los datos obtenidos para la simulación del método propuesto.

El modelo de transmisión de celdas (CTM) se propuso originalmente con el propósito de describir el comportamiento macroscópico de los vehículos en un corredor vial determinado mediante la evaluación del flujo y la densidad del tráfico para resolver la ecuación de onda cinemática (Daganzo, 1994; Daganzo, 1995; Lighthill y Whitham, 1955; Richards, 1956). El CTM utiliza un espacio discreto con un número finito de puntos intermedios en diferentes pasos de tiempo (Tak, Kim & Yeo, 2017). Posteriormente, en 2007, Asano et al.,

modificaron el CTM para representar los flujos peatonales al permitir el flujo multidireccional entre celdas. Logrando así que las reglas de transmisión de celdas estándar CTM puedan aplicarse en el flujo multidireccional de peatones. (Li & Guo, 2020).

Por otro lado, se realizó el modelo hexagonal en el que el usuario o peatón tiene 6 movimientos diferentes, puesto que según Tak, Kim & Yeo, (2017) menciona que a un mayor número de direcciones deseadas en los usuarios causan mayor conflicto. Es por este motivo, que no se propone el modelo multidireccional extendido de 8 movimientos. Puesto que, en el trabajo de investigación realizado por Tak, Kim & Yeo, (2017) en el que consideraron que habría una reducción del 10% en la capacidad de la celda, si el número de direcciones deseadas es 3 o 4. La capacidad se reducirá en un 20%, si el número de direcciones deseadas es 5 o 6 (Ver figura 2), y el 30% será reducirse, si el número de direcciones es 7 u 8 (Ver figura 3). Además, se consideró para este trabajo que la capacidad de celdas se reducirá debido a los conflictos entre agentes en un 20% de la capacidad total con el fin de estimar el valor flexible de una celda.

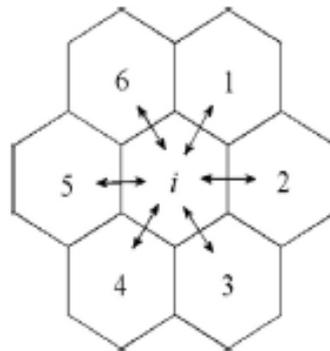


Figura 2. Celda i y sus 6 celdas vecinas. Adaptado de *Simulation of bi-directional pedestrian flow through a bottleneck: Cell transmission model*, por Li y Guo, 2020.

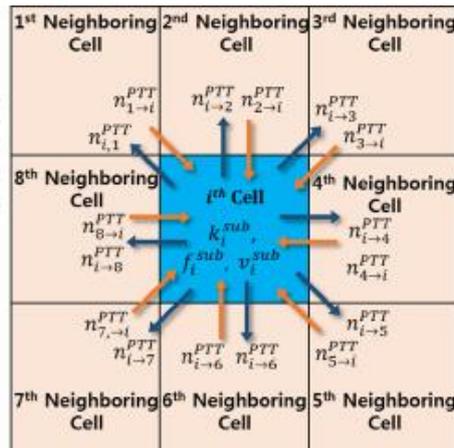


Figura 3. Cálculo de número de peatones bajo demanda. Adaptado de *Agent-based Pedestrian Cell Transmission Model for Evacuation*, por Tak Kim y Yeo, 2017.

El modelo bidireccional hace referencia al comportamiento entre peatones para reflejar la espontaneidad y la humildad que tienen los usuarios en la dirección opuesta y que eligen la misma celda en destino. Es decir, que estos hacen un acto de cortesía para ceder el paso o en general, caminar de lado y dejando que otros peatones se adelante. En esta investigación, se tomaron en cuenta las características del flujo bidireccional a través de cuellos de botella (Li & Guo, 2020).

Por último, se aplicó el modelo planteado por las razones siguientes:

- Facilidad de cálculos en la gran cantidad de peatones.
- Costo computacional relativamente bajo comparado con el enfoque microscópico.
- Se discretizan los espacios para caminar en una serie de cuadrículas triangulares, cuadradas y hexagonales.
- Para igualar el nivel de detalle de los movimientos de la multitud.

4 ESTUDIO DE LA PROBLEMÁTICA

4.1 RECONOCIMIENTO DE TÉCNICAS EXISTENTES

Para una mejor comprensión de la problemática en este caso de estudio es importante identificar y reconocer aquellas técnicas ya existentes que buscan simular el flujo peatonal del escenario planteado. Para ello, se analizó las siguientes técnicas.

4.1.1 CELL TRANSMISSION MODEL

Esta técnica es un modelo de simulación para el comportamiento de un grupo de estudio, el cual consiste en que cada usuario se representa sobre una tabla como una figura geométrica, en el que se tiene contacto con otras celdas de las mismas dimensiones e interactúan de manera aleatoria con movimientos, los cuales se restringen de acuerdo con el modelo de estudio (Gwizdalla, 2015).

El CTM relaciona la velocidad con la densidad de cada celda para determinar el flujo de personas entre una celda y otra a través del tiempo, permitiendo predecir el estado del tráfico en el espacio analizado. (Tak, Kim & Yeo, 2017). Además, realiza una búsqueda de una ruta adaptativa donde la dirección, y el efecto de búsqueda en la que influye la demanda geométrica y origen-destino del viaje.

Por otro lado, por estudios e investigaciones realizadas por otros autores hay diferentes modelos de cell transmission model de las cuales se diferencian mediante el número de direcciones deseadas a la cual se le denomina grados de libertad de movimiento. En el siguiente gráfico se muestra, las representaciones de celdas según sus formas y los grados de libertad que permite cada una de ellas. A continuación, se muestra el desarrollo de cada uno de los diagramas según su grado de libertad. (Ver figura 4)

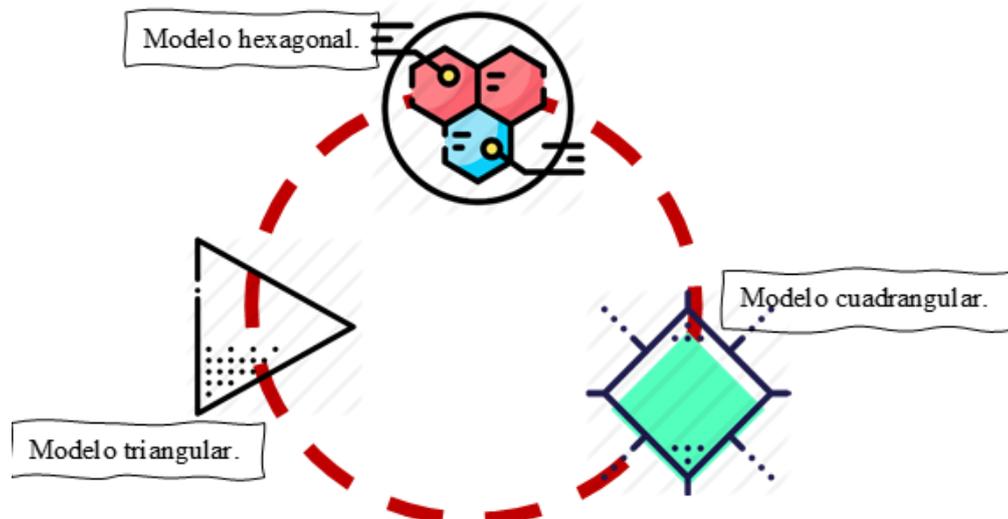


Figura 4. Modelos de CTM según su forma y grados de libertad. Elaboración propia.

Según Tak, Kim & Yeo, (2017) consideró que existe una reducción del 10% en la capacidad de la celda, siempre y cuando el número de grados de libertad o direcciones sean 3 o 4. Menciona también que la capacidad de celda con grados de libertad de 5 o 6 se reducirá en un 20% y el 30% se reducirá, si el número de direcciones es 7 u 8.

4.1.2 ALGORITMO CINÉTICO MONTE KARLO (KMC)

El algoritmo cinético de Monte Carlo es una técnica que apoya a la simulación de movimientos al azar de peatones, debido a que proporciona aleatoriedad ya que es un método estadístico que se basa en un sistema de datos propuestos. Sun, (2019) utiliza este algoritmo de Monte Carlo sumado al modelo de autómatas celular para restringir pasos y de esta manera reducir los escenarios de movimientos aleatorios ya que se trata de direcciones establecidas para cada flujo peatonal. Otra ventaja del método KMC es la capacidad de proporcionar mayor exactitud a la evolución del tiempo en el sistema planteado, mostrando la variación de movimientos de los flujos peatonales con respecto al paso del tiempo. Esto debido a que el KMC es más adecuado para simular un sistema no equilibrado. Al tratarse de un modelo matemático para generar los movimientos, se debe plantear las funciones considerando variables como velocidad, tamaño y densidad de flujo, puede apoyar con software de programación para la propuesta.

El modelo KMC se basa en múltiples consideraciones recolectadas en su bibliografía, es por ello por lo que puede agregarse al modelo casos como dos direcciones opuestas (bidireccionalidad) e incluso proponer un reordenamiento masivo tomando en cuenta carriles de preferencia o retroceso de personas. Lo cual aporta a la dinámica de modelación un comportamiento similar al que ocurre en una plataforma de embarque dentro de una línea de tren. La desventaja de este modelo es que el área de desarrollo no puede presentar dificultades como espacios confinados o restricciones de movimientos como varadas. Es por ello por lo que, al modelar la plataforma del tren eléctrico con el fenómeno del cuello de botella, se dificulta para este modelo. (Ver figura 5)

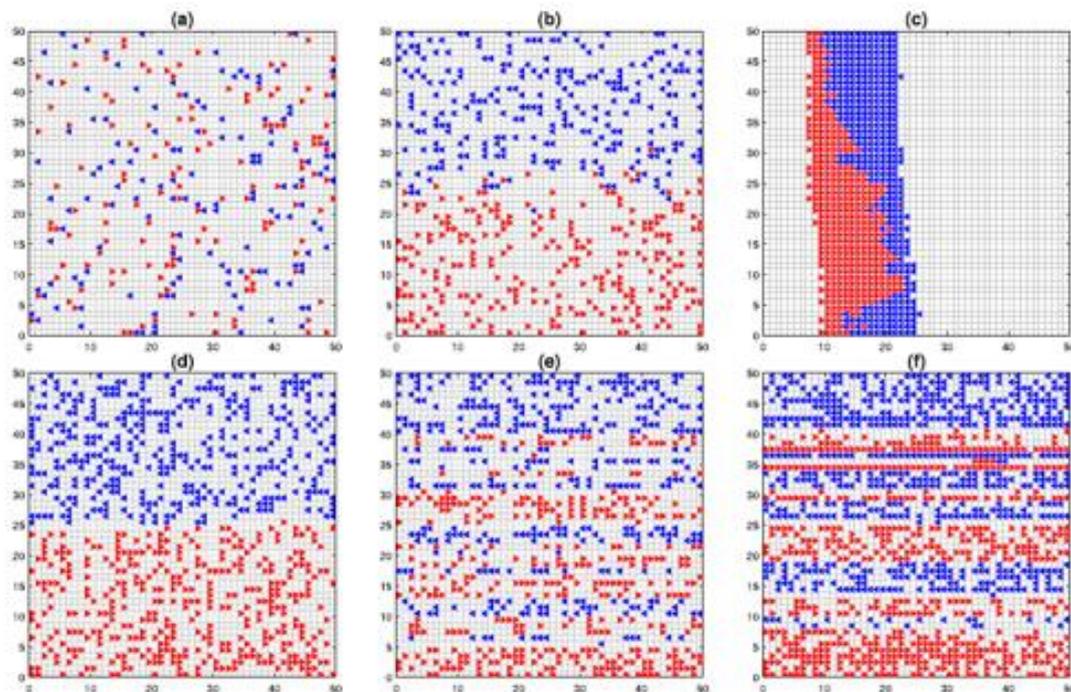


Figura 5: Configuración de un área cuadrada con un flujo bidireccional con aumento de tiempo y densidad. Adaptado de *Simulations of bi-direction pedestrian flow using kinetic Monte Carlo methods*, por Sun, Y, 2019.

4.1.3 NOMAD Y SIMPED (MÉTODO DE SIMULACIÓN DE PEATONES)

Gonzales, (2011) describe a NOMAD como un software de licencia libre utilizados con la finalidad de simular comportamientos peatonales, consideran dos modelos microscópicos. El primero predice la actividad peatonal en elección de áreas y rutas de los peatones. El segundo, para describir el comportamiento al caminar. Estos modelos adoptan una simulación microscópica que se puede ejecutar sobre un escenario propuesto y ser llevado a una estación de trenes real. SimPed es otro software de acceso abierto utilizado con la misma finalidad. Sin embargo, utiliza un enfoque macroscópico en su simulación. Este software considera además la interacción de los peatones con los vehículos de transporte público, también estima la media de los tiempos de a bordo de los pasajeros. Así mismo, en su simulación se verifica el impacto del diseño del área de transbordo junto con los horarios del sistema de transporte público.

Esta herramienta al tratarse de un software que se ejecuta con datos específicos para funcionar no cuenta con una consideración de distanciamiento entre usuarios o peatones. Esto debido a que simula movimientos naturales de sujetos dentro del área de estudio, usuarios vistos como independientes que pueden aglomerarse como en una situación ordinaria. Por otro lado, la bidireccionalidad está considerada en el supuesto de agregar un área de transbordo donde dos flujos peatonales opuestos chocasen. Sin embargo, no profundiza este fenómeno ya que se trata de un escenario más que el modelo presenta en la simulación. Sin darle un enfoque por ese lado, se descuida la intención de preservar la seguridad de los usuarios y solo se aprecia el comportamiento natural del flujo.

4.1.4 COMPARACIÓN DE MÉTODOS EXISTENTES

La intención de la investigación fue simular el flujo peatonal durante el fenómeno de embarque y desembarque en una estación del tren, se han considerado tres distintos métodos para lograr una simulación correcta que refleje la realidad en la línea 1 del Metro de Lima. Sin embargo, entre ellos uno destaca ya que, al ser adecuado a la zona de estudio, cumple con dos situaciones que distinguen una simulación en una estación del tren con otras simulaciones de flujo peatonal. Estas son: El fenómeno del cuello de botella y la intención de los peatones de evacuar en una dirección.

El software de simulación de densidad peatonal SIMPED es un programa de licencia abierta que proporciona al usuario una interfaz en donde se puede modelar un espacio en vista planta, junto con parámetros que en software requerirá, esta área reflejará el escenario específico donde el flujo peatonal correrá. La ventaja de este método es la facilidad de poder diseñar un área que se asemeje a la estudiada pero la densidad de los usuarios, aunque bien es un parámetro, no refleja el comportamiento real durante el embarque en una estación del tren. Además, no contempla el distanciamiento ni ajustando los datos requeridos para iniciar la simulación.

El método cinético de Monte Carlo es un método estadístico que simula de manera aleatoria los desplazamientos de celdas en un plano bidimensional que apoyado de reglas que pueden ser programadas, se simularía un flujo peatonal. Sin embargo, este flujo no puede ser llevado al sistema de una estación del tren debido a que no simula la aglomeración de peatones al pasar por un cuello de botella, el cual es el fenómeno producido durante el embarque a los vagones del tren.

Por último, el modelo de transmisión celular es un método matemático que genera funciones con una variable de tiempo que simula el movimiento de celdas hexagonales en una malla sobre el plano real del área estudiada. Siendo ajustado con parámetros en su desarrollo, puede

modelar de manera simultánea las dos consideraciones del fenómeno de embarque y desembarque.

De esta manera, se evaluó los tres métodos según como se adecuan al estudio presente y se desarrolló un cuadro que indica sus ventajas frente a los demás modelos. Por ende, el modelo de transmisión celular es el método que fue elegido y el cual será desarrollado.

4.2 ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE TRASMISIÓN DE CELDAS

4.2.1 CELDAS HEXAGONALES EN UN TRAMO BIDIRECCIONAL

Cuando los peatones en la dirección opuesta eligen la misma celda de destino, harán un acto de amabilidad en general. Donde se produce un "punto muerto", las celdas cercanas al cuello de botella están completamente bloqueadas y nadie en el sistema puede moverse. El sistema parece caer en un estado estático.

Se cree que es causado por el comportamiento de seguir o evitar a los peatones. En otras palabras, el movimiento de los peatones en el proceso de propagación se puede dividir en dos tipos: seguir a los peatones adelante en la misma dirección y evitar a los peatones adelante en la dirección opuesta. De esta forma, los peatones en la parte delantera o en el borde del carril protegen a los peatones en la parte trasera o en el medio del carril. Por lo tanto, los peatones protegidos se verán menos afectados por los peatones circundantes de los otros grupos. Entonces es posible una mayor velocidad al caminar. (Li & Guo, 2020).

Las celdas están organizadas de manera que se forma una estructura similar a la de una colmena de abejas. De esta manera, cada hexágono podrá albergar como máximo dos personas, debido a la actual coyuntura (COVID 19). Así mismo, las celdas hexagonales permiten que las personas interactúen conforme se desplazan hacia uno de los lados libres o aquellos grados de libertad no restringidos (analizados en el capítulo anterior), permitiendo así que éstas tengan la posibilidad de interactuar con las celdas libres en el movimiento. (Ver figura 6)

Es decir, que las personas al desplazarse tienen una comunicación visual con su posterior, ya que optan por ceder el paso al momento de desembarcar y embarcar. Con este supuesto, se toma el comportamiento que tiene cada usuario como un parámetro para el posterior análisis matemático y modelamiento.

Así mismo, como lo menciona Li & Guo (2020) que, al establecer parámetros de humildad de una manera razonable, se logra reducir las congestiones de tráfico y puntos muertos, en la cual se basó este trabajo de investigación.

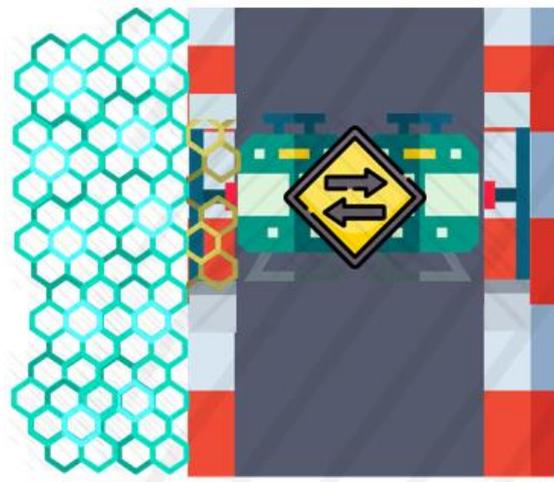


Figura 6: Celdas hexagonales distribuidas en la plataforma de embarque y desembarque. Elaboración propia.

El parámetro analizado, el grado de humildad o cortesía, se considera en aquellos pasajeros que descienden durante un determinado tiempo. Del mismo modo, sucede con los peatones del sentido contrario que eligen la misma celda de destino para desplazarse. Este parámetro se refiere al acto en general, por ejemplo, de ceder el paso, de caminar hacia un lado o dejar que otros pasajeros se adelanten, esperar que primero desciendan para luego poder subir, etc. En caso contrario, los pasajeros que embarcan suelen ocupar más espacio, debido a que se encuentran con los pasajeros que desembarcan y al ocupar la misma celda, se genera un conflicto en la cual se compite por la misma celda de destino. (Li & Guo, 2020). Cabe mencionar que estos parámetros se analizaron y se incluyeron más adelante.

4.2.2 CELDAS HEXAGONALES EN ÁREAS REDUCIDAS

Se investigó las características del flujo peatonal bidireccional a través de cuellos de botella con diferentes anchos. Sin pérdida de generalidad, este modelo simuló el proceso de embarque y desembarque de pasajeros para un escenario específico, es decir, el área de la plataforma del tren o metro.

Además, para investigar más a fondo los efectos del cuello de botella con diferentes anchos en el tiempo total de abordaje y descenso. Sin embargo, para la misma densidad inicial de peatones, el tiempo total de abordaje y descenso disminuye con el aumento del ancho del cuello de botella. Especialmente, a medida que aumenta la densidad de peatones, el grado de aumento del tiempo total de abordaje y descenso es mayor (Li & Guo, 2020).

El modelo planteado está adaptado para la evaluación en espacios reducidos como son las puertas de cada vagón de tren. Cabe destacar que, cada puerta se comporta como cuello de botella, en el cual los usuarios interactúan de manera ineficiente generando conflictos al momento de embarcar o desembarcar en la plataforma en estudio. Además, al tener un área reducida, hay un menor flujo de pasajeros. Por ende, se genera aglomeración de personas en ese punto, que se denominará (línea o zona de conflicto). De la misma manera, si los anchos de la línea de conflicto aumentan, aumentarían el flujo de peatones.

De manera análoga, se considerará que los pasajeros al momento de interactuar algunos suben rápidamente para ocupar un asiento libre y viajar cómodamente. Sin embargo, eso genera conflicto produciendo posteriormente un cuello de botella con aquellos usuarios que llegaron a su destino y desean desembarcar.

5 DESARROLLO DEL MODELO

5.1 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

El área de estudio es la estación Angamos de la Línea 1 del metro de Lima, el motivo de estudio es que es una estación que posee una alta atracción de viajes. Esto debido a que a alrededor se encuentra el Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas (INEN), coliseo Eduardo Dibós, Parque Reducto, Real Plaza, Coney Park Angamos, Odyssey, etc. En consecuencia, esto genera que muchas personas lleguen de distintos distritos, el motivo de viaje es diverso, lo cual se estudió en los próximos capítulos.

5.1.1 DATOS OBTENIDOS DEL ÁREA DE ESTUDIO

Mediante el portal de acceso a la información pública y la mesa de partes virtual de la Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao (ATU). Se obtuvo información como los datos de la demanda promedio en un día hábil de los años 2019 (prepandemia) y 2020 (pandemia) (Ver Anexo 2). Además, los planos de la estación Angamos que son parte del expediente final y volumen 3. (Ver figura 7)

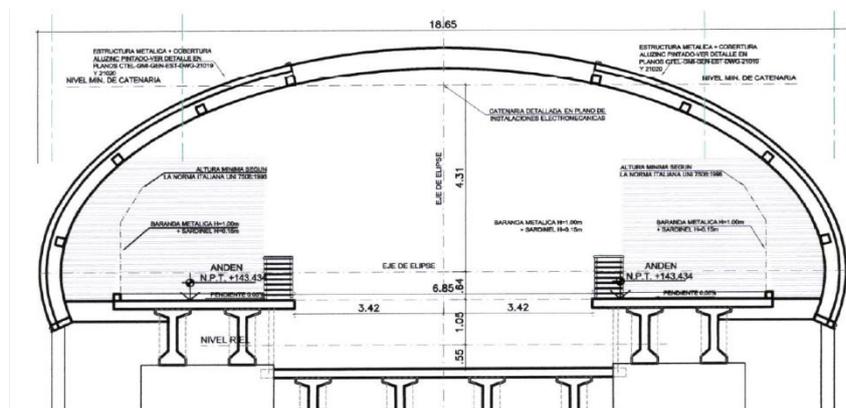


Figura 7: Plano de detalle del segundo nivel de la estación Angamos de la Línea 1 del metro de Lima. Adaptado de *Expediente técnico final-Volumen N°3: Planos. Estación Angamos-Área de pasajeros*, por la ATU, 2010.

Por otro lado, se realizó a detallar los datos obtenidos de los planos para un mejor entendimiento del área de estudio, la plataforma de embarque y desembarque, en las cuales se realiza un área estimada de influencia por el método planteado modelo de transmisión de celdas (MTC). (Ver figura 8, 9 y 10).

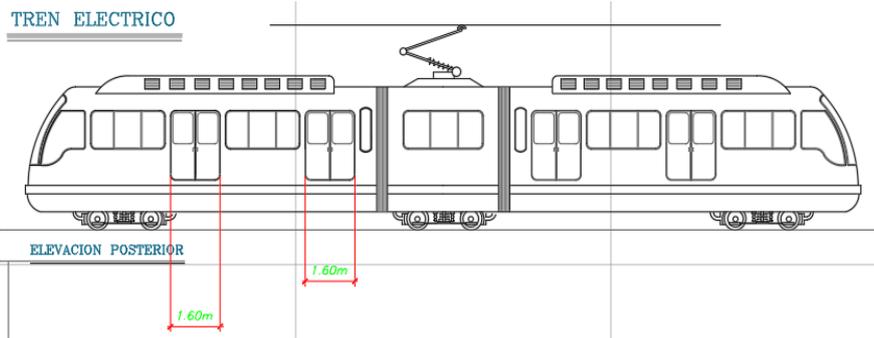


Figura 8: Dimensiones de las puertas del tren Alstom Metrópolis 9000. Elaboración propia.

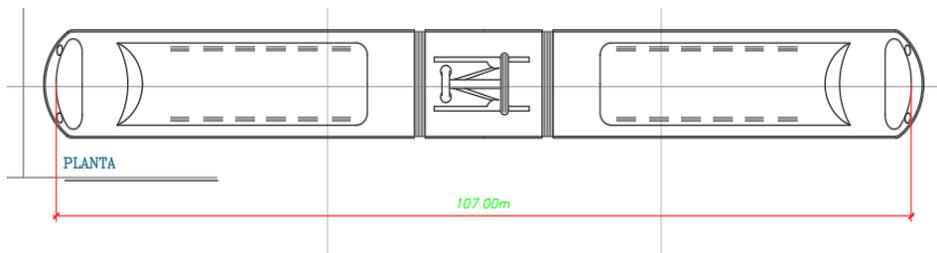


Figura 9: Longitud del tren español modelo Alstom Metrópolis 9000. Elaboración propia.

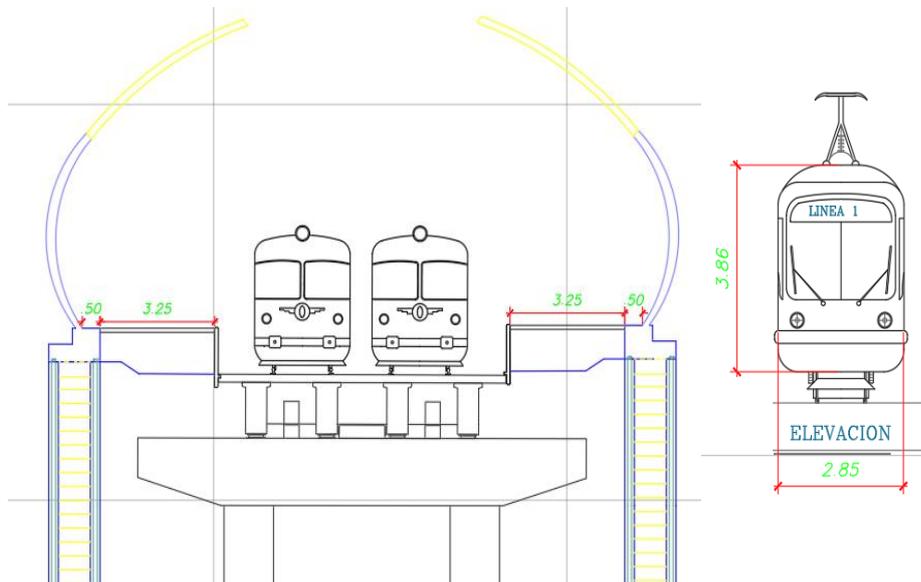


Figura 10: Dimensiones de la plataforma de embarque. Elaboración propia.

La recolección de estos datos en mención, sirvieron para poder diseñar el modelo considerando los anchos de puerta y espaciamiento dentro de los vagones.

5.1.2 DEMANDA PEATONAL EN LA PLATAFORMA

Para entender los detalles del comportamiento del flujo de pasajeros en la estación de Angamos, se especifica el análisis de los datos de las demandas promedio en día hábil 2019, brindados por el portal de acceso a la información pública Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao (ATU). Para un mejor detalle y comprensión de información (Ver Anexo 3).

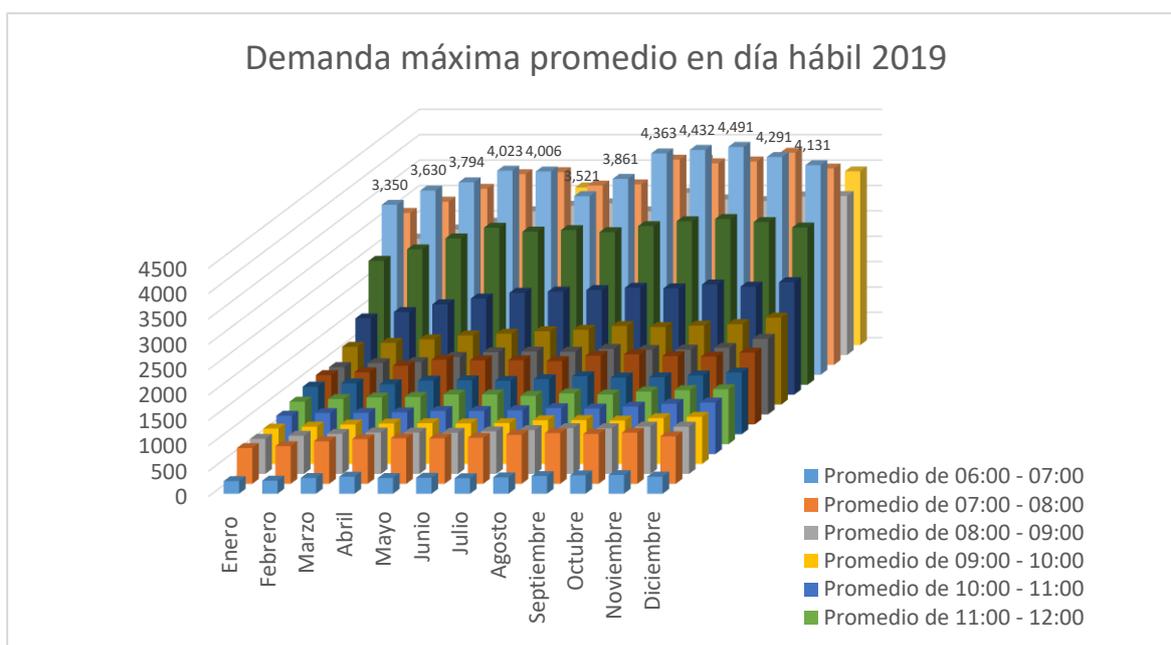


Figura 111: Demanda máxima promedio en día hábil 2019. Elaboración propia.

Al procesar la información obtenida se observó que la mayor demanda en un día hábil es en promedio de las 18:00 a 19:00 horas en todos los meses del año (Ver figura 11). El promedio del flujo de pasajeros en la hora pico es de 3991 y el mes en el que mayor flujo presentó fue el mes de octubre con 4491 pasajeros.

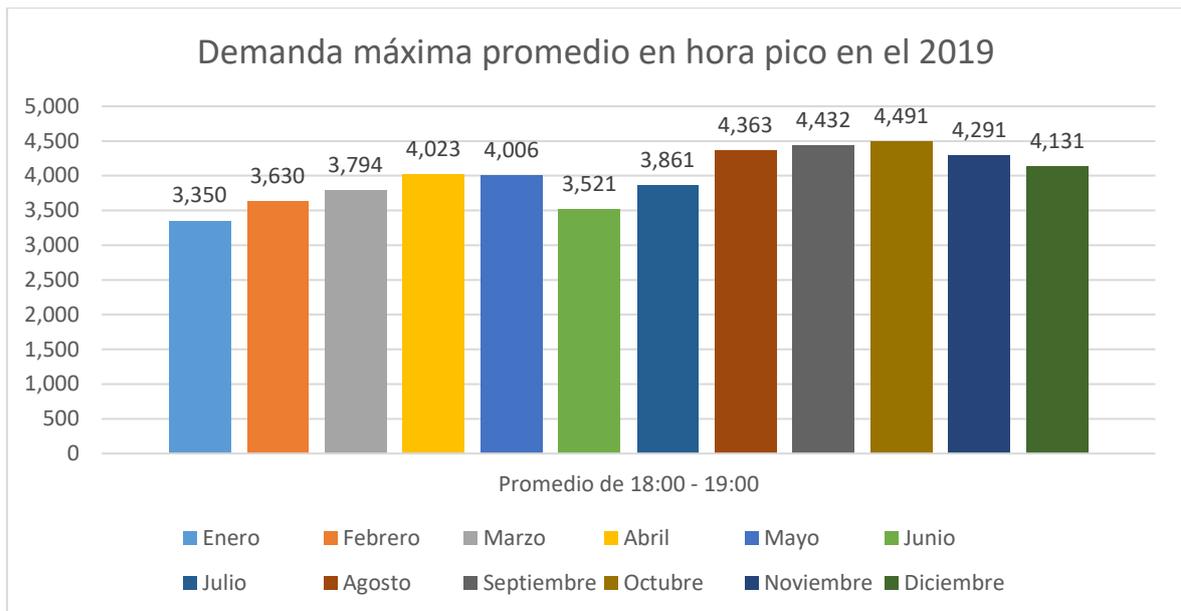


Figura 12: Demanda máxima promedio en hora pico en el 2019, prepandemia. Elaboración propia.

Por otro lado, se conoce que la frecuencia de trenes en hora pico es de cada 3 minutos, entonces la cantidad de llegada de trenes en hora pico o de alta demanda es de 20. En este análisis, se contó, además, con la cantidad de vagones por cada tren del modelo español Alstom metrópolis 9000 con 6 unidades. Se consideró que la cantidad de pasajeros es equitativa por cada vagón de 17.5m y que cada vagón cuenta con 4 puertas de longitud de 1.60m.

Este análisis se realizó con el fin de obtener los datos más precisos para realizar el modelado correcto y real de la propuesta con la transmisión de celdas hexagonales, ya que para la propuesta los datos reales son importantes, debido a que se toma en cuenta el efecto de bidireccionalidad al momento de embarcar o desembarcar del tren.

De la figura 12, se puede obtener datos importantes como la cantidad de pasajeros que pasan por una puerta de vagón, dato necesario para simular el modelo propuesto. Se observa que en un día hábil en hora pico se tiene un promedio de 8 personas interactuando al momento de pasar por la puerta (cuello de botella) una cantidad prudente y variable para generar el

problema que se está analizando. Además, se consideró que la cantidad de usuarios se distribuye equitativamente, alrededor de todo el vagón al momento de desembarcar. Proceso que no ocurre en el área de la plataforma del andén, debido a que las personas optan por acercarse a la puerta y vagón que ven más vacío.

5.1.3 ANÁLISIS DE DEMANDA EN LA PLATAFORMA

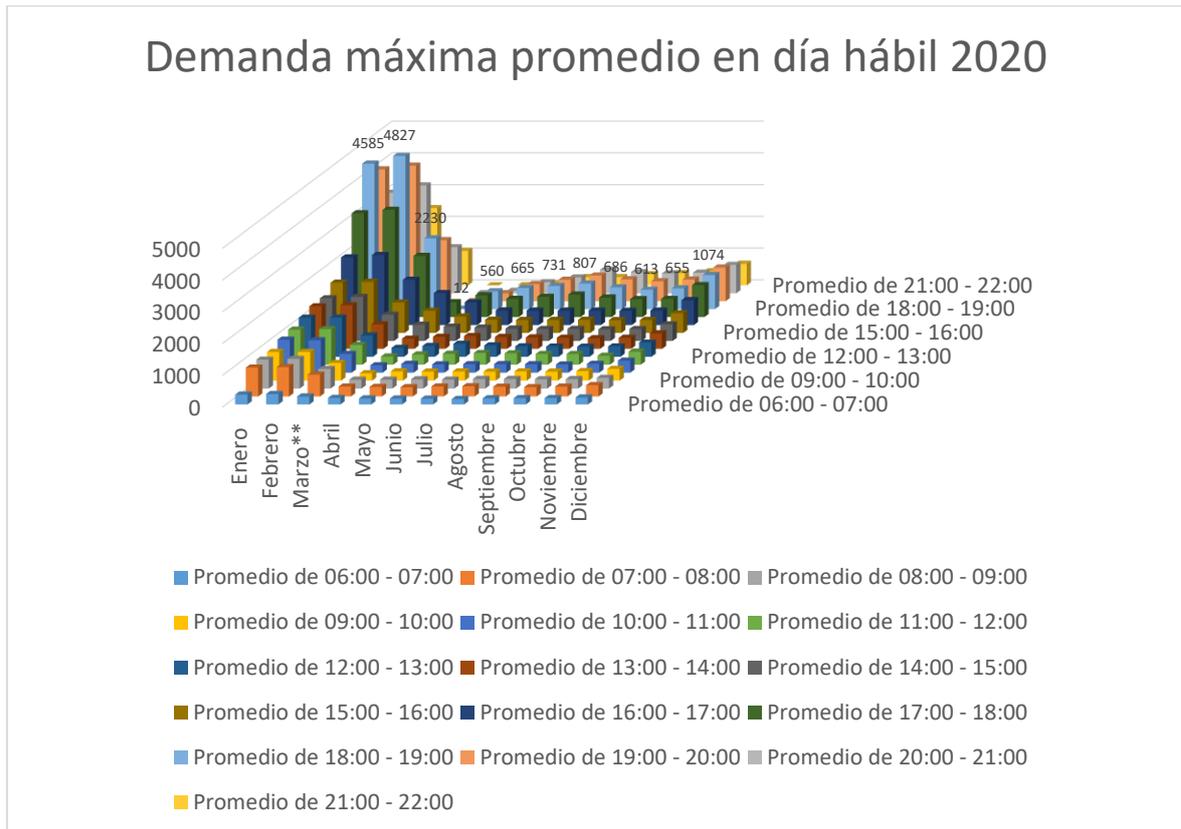


Figura 13: Demanda máxima en un día hábil año 2020. **Marzo, inicio de pandemia. Elaboración propia.

De la figura 13, se puede observar que a partir del mes de marzo el flujo de pasajeros cae radicalmente en lo que respecta la demanda de viajes, esto debido a que el país experimentaba una cuarentena total. Sin embargo, la hora pico seguía manteniéndose de las 18:00 a 19:00 horas a pesar de las restricciones, personal de salud, periodismo y otros sectores, aún mantenían el uso de los servicios.

Por otro lado, se observó que a partir del mes de abril existió una tendencia de crecimiento en el flujo de pasajeros. (Ver figura 20).

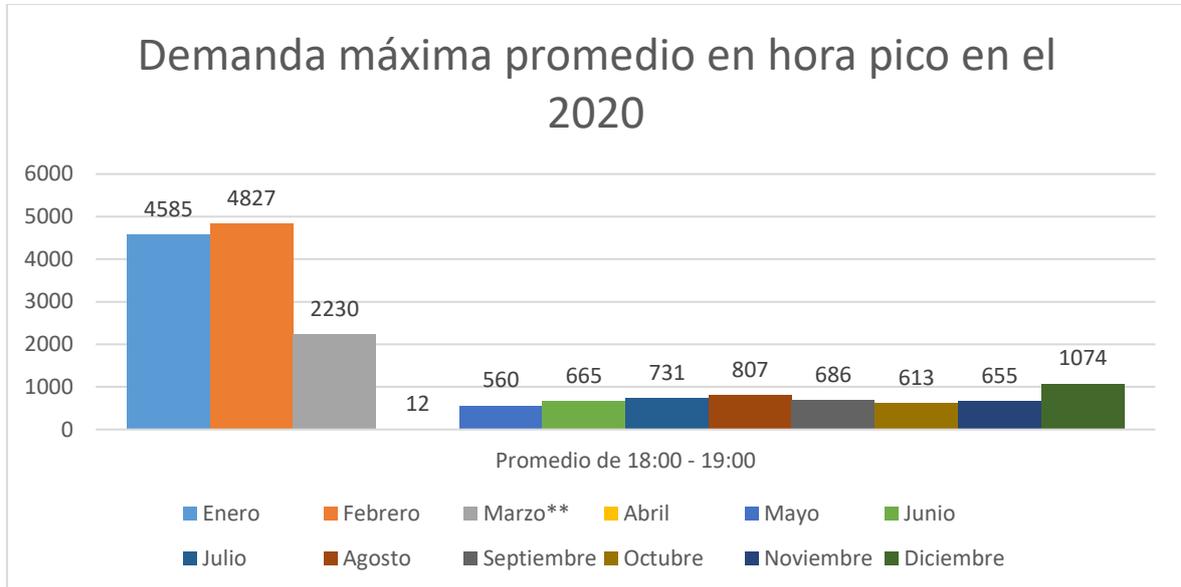


Figura 14: Demanda máxima promedio en hora pico en inicio de pandemia 2020. Elaboración propia.

De la figura 14, se observa que en el mes de abril la demanda bajó radicalmente a solo 12 usuarios debido a las restricciones puestas por el gobierno peruano, cuarentena obligatoria por 15 días y esta se iba extendiendo cada vez que se presentaban nuevos casos. En consecuencia, la demanda de la línea uno del metro de Lima se vio afectada.

Por otro lado, la demanda fue aumentando conforme las restricciones se iban levantando, y las personas usaban más el medio de transporte para trasladarse ya sea un motivo específico de viaje, trabajo, visita, compras, centro de salud, etc. Cabe mencionar que, las restricciones afectaron al modelo planteado, pues la intención del modelo es simular la aglomeración o hacinamiento que se da en las puertas de embarque al momento de embarcar o desembarcar de la línea uno del metro de Lima. Por ende, se respetó los datos y se simuló en dos escenarios para validar que el modelo realmente funciona. (Ver figura 15).

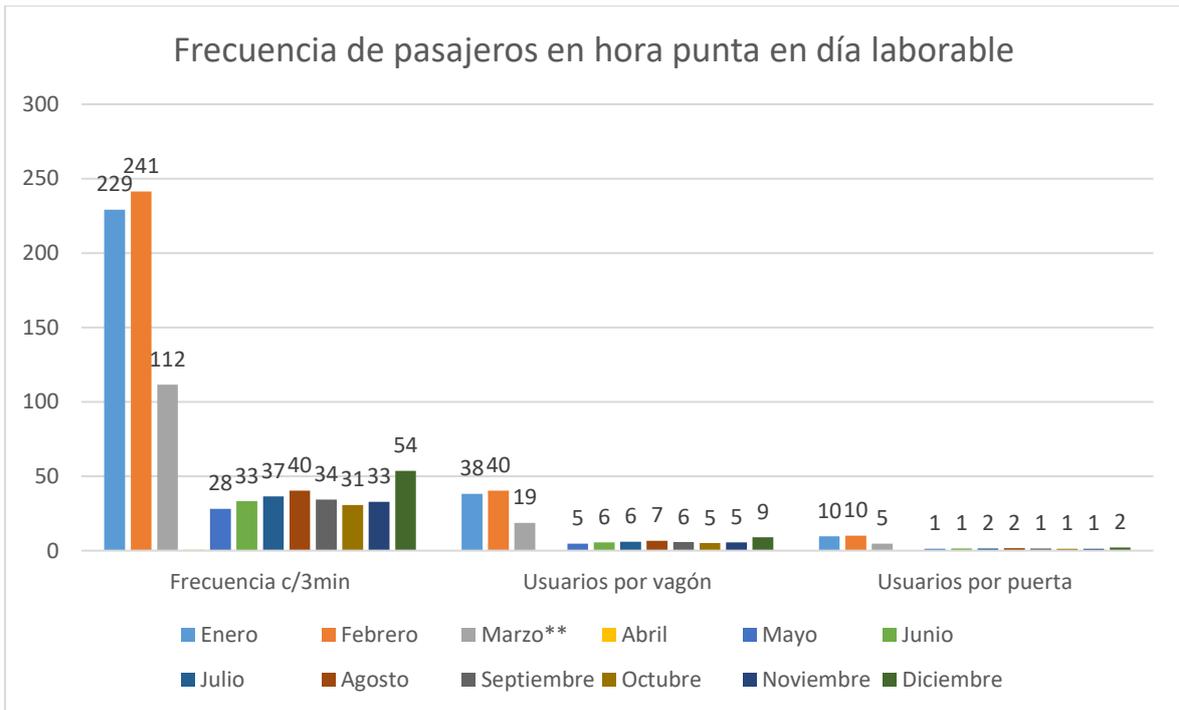


Figura 15: Frecuencia de pasajeros en hora punta en día laborable. Pandemia marzo 2020. Elaboración propia. De la figura 15 se puede observar que la reducción es bastante significativa respecto a la figura 14, ya que la disminución es del 66% aproximadamente en la interacción de los usuarios por puerta. Además, la cantidad de pasajeros que ocupan un vagón es baja respecto a los 35 usuarios que hubo en el año 2019.

5.1.4 CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LA ESTACIÓN

Número máximo de peatones. Para este cálculo el flujo de personas en la estación en los años 2019 y 2020 se obtuvo por los datos brindados por la ATU (Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao). (Ver Anexo 3.)

- ✓ Cálculo de datos geométricos de celdas (Ver figura 11):

$$A_i = \frac{6 * s * h}{2} \quad (1)$$

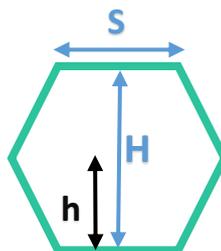


Figura 16: Dimensiones geométricas de celda hexagonal. Elaboración propia.

Dónde:

A_i : Área hexagonal
 s : Longitud de celda
 H : Altura
 h : Altura media

Tabla 1
 Datos geométricos de celdas hexagonales prepandemia y pandemia

Datos geométricos Prepandemia (2019)		Datos geométricos pandemia (2020)	
S	0.6m	S	0.4m
S/ 2	0.3m	S/ 2	0.2m
h	0.52m	h	0.35m
H	1.04m	H	0.69m
A	0.94m ²	A	0.42m ²

Fuente: Elaboración propia.

✓ Parámetros iniciales para el cálculo de Q_{ij} .

$$Q_{ij} = \frac{a_{ij}}{s} \cdot \bar{Q} \quad (2)$$

Donde:

Q_{ij} : número máximo de peatones que pasan entre una abertura.
 i : celda.
 a_{ij} : longitud entre dos celdas.
 j : celda vecina.
 s : es la longitud de lado de celda.

Tabla 2
 Parámetros iniciales para el cálculo del número máximo de peatones que pasan por una abertura en situación pandemia y prepandemia

Parámetros iniciales Prepandemia (2019)			Parámetros iniciales Pandemia (2020)		
a_{uv}	1.2	m	a_{uv}	1.2	m
s	0.6	m	s	0.4	m
Q	8	usuarios	Q	3	usuarios
Q_{uv}	16	usuarios	Q_{uv}	9	usuarios

Fuente: Elaboración propia.

✓ Cálculo de capacidad de cada celda (N_u).

$$N_i = \frac{b_i \cdot F_{rh}}{c} \cdot \bar{N} \quad (3)$$

Donde:

N_i : Capacidad máxima de celda.

b_i : Espacios libres en celdas vecinas.

c : Área de la celda con longitud de lado s .

\bar{N} : Capacidad máxima de una celda vacía.

F_{rh} : Factor de reducción (hombro a hombro)

Tabla 3

Parámetros iniciales para el cálculo de la capacidad máxima de peatones por celda en situación pandemia y prepandemia

Parámetros iniciales Prepandemia (2019)	Parámetros iniciales Pandemia (2020)
2	1
0.94 m ²	0.42 m ²
6 usuarios	1 usuarios
0.5 m	0.65 m
6 usuarios	2 usuarios

Fuente: Elaboración propia.

Entonces el modelo final con la geometría de cada celda dentro de la plataforma sería la siguiente. (Ver figura 17)

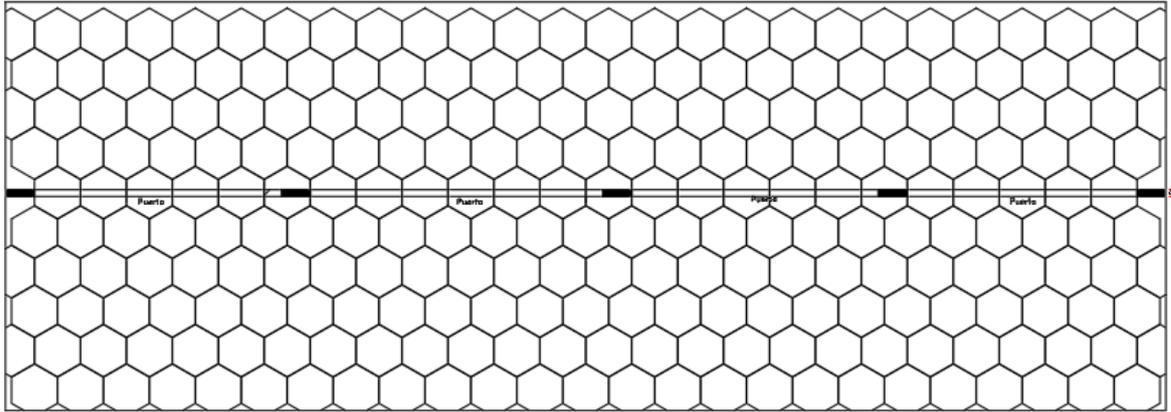


Figura 17: Adaptación de celdas hexagonales en toda la plataforma, en embarque y desembarque. Elaboración propia.

5.2 DESARROLLO DEL MODELO

El desarrollo del modelo está basado en la observación del conflicto que se genera en el proceso de embarque y desembarque de los usuarios en la plataforma en la estación Angamos de la línea uno del metro de Lima. A pesar de la longitud reducida de la puerta de salida y entrada de los vagones, el espacio en toda el área interior se discretiza a través de celdas hexagonales regulares de un lado de longitud “s” (Ver figura 16). La estructura definida de cada celda es isotrópica, lo que permite definir el flujo de peatones hacia celdas vecinas en términos similares (Guo, Huang & Wong, 2011).

Por otro lado, individualmente cada celda hexagonal solo puede acomodar una capacidad limitada de peatones en proporción al área de espacio libre en cada una de las celdas y los pasajeros solo pueden moverse hacia seis celdas vecinas. El escenario planteado consiste en una región rectangular que simula un vagón y otra que simula la plataforma de embarque y desembarque. La puerta del vagón tiene un espesor “e” (Ver figura 18), que se considera como un cuello de botella en medio de ambas regiones rectangulares.

Se consideró que todos los usuarios en un momento inicial están distribuidos uniformemente. Luego de que los peatones de ambos sentidos, embarque y desembarque atraviesan la puerta (cuello de botella) y avanzan hasta llegar al límite opuesto. En otras palabras, las celdas

fronterizas disponibles o libres son destinos para los pasajeros que descienden. De igual manera, las celdas del otro sentido son destinos para los pasajeros que embarcan.

Cabe mencionar que, los estados de los pasajeros se actualizan en cada momento en un intervalo de tiempo Δt . Sea Q el número máximo de peatones que fluyen a través de la abertura entre dos celdas vecinas en un intervalo de tiempo Δt .

Se define como celdas conectivas y no conectivas. Cuando los límites de dos celdas vecinas se encuentran restringidas o bloqueadas por algún obstáculo y los pasajeros no pueden trasladarse de una celda hacia otra, a este concepto se le denomina celdas no conectivas. En el caso contrario, son llamadas celdas conectivas.

El potencial de cada celda está definido como la aproximación de la distancia hacia la ruta de salida. Es decir, el potencial de cada celda va aumentando a medida que aumenta la distancia de la celda en dirección a la entrada o salida. Los resultados empíricos demuestran que, aunque los pasajeros eligen con frecuencia la ruta más corta, rara vez son conscientes de que minimizan la distancia como estrategia de elección de ruta. (Guo, Huang & Wong, 2011).

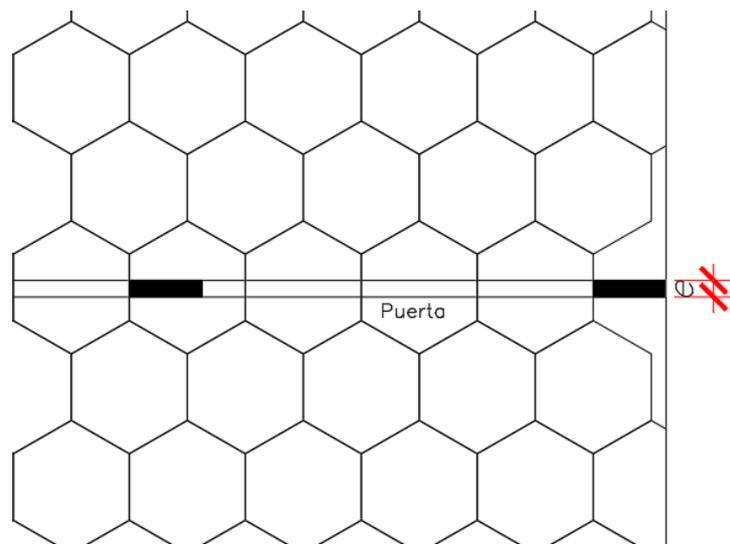


Figura 18: Identificación del espesor de puerta en el diseño.
Elaboración propia.

5.2.1 PREPARACIÓN DE PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

Se desarrollaron simulaciones del mismo escenario considerando primero, la cortesía en un flujo bidireccional con el valor de α , y segundo, sin considerar la cortesía pues se toma en cuenta la regla de primero desembarcar y luego embarcar para poder contribuir al distanciamiento como medida protocolar. El primer modelo de simulación tiene como fundamentos básicos distintos términos que se utilizan para describir el escenario en el que el flujo peatonal se va a desarrollar. Es por ello, que se describieron las variables para tener en cuenta para cada una de las ecuaciones. De esta manera, se podrán realizar los cálculos para cada relación de celdas enfocadas en una misma dirección.

La primera de las ecuaciones es para calcular el $D_{ij}^L(t)$, el cual indica la proporción de peatones enfocados en trasladarse de la celda i a la j en un intervalo de tiempo t . El algoritmo para desarrollar es el potencial celular y se detalla de la siguiente manera con la fórmula siguiente con el objetivo de incluir parámetros u factores como la cortesía que tiene un usuario al momento de embarcar o desembarcar de la plataforma:

$$D_{uv}^L(t) = \begin{cases} \frac{\Delta P_{uv}^L \cdot F_{rh} \cdot \max[\alpha^L(t)N_v - n_u^L(t), 0]}{\sum_{k \in U_u^L} \Delta P_{uk}^L \cdot \max[\alpha^L(t)N_k - n_v^L(t), 0]}, & v \in U_u^L \\ 0, & \end{cases} \quad (4)$$

Donde:

ΔP_{ij}^L : Diferencia de potenciales entre la celda i y la celda j .

N_v : Número máximo de peatones que se pueden acomodar en espacios libres.

$\alpha^L(t)$: Consideración de cortesía de los pasajeros que bajan en el paso del tiempo.

$n_j^L(t)$: Número de personas en la celda j que se dirigen hacia el límite izquierdo en el paso del tiempo.

$R_i^L(t)$: Conjunto de celdas adyacentes aguas abajo de la celda i correspondiente al límite izquierdo.

R_i : Conjunto de celdas aguas debajo de la celda i que pueden ser consideradas como ruta.

La segunda ecuación corresponde al valor de $w_{ij}(t)$, este dato indica el número de peatones que pueden pasar de la celda i a la celda j en un intervalo de tiempo determinado. Este valor se calcula mediante la siguiente fórmula que además tiene condicionales con otros valores ya calculados:

$$w_{ij}(t) = \begin{cases} D_{ij}^L(t)n_i^L(t), & D_{ij}^L(t)n_i^L(t) + D_{ji}^L(t)n_j^L(t) + D_{ij}^R(t)n_i^R(t) + D_{ji}^R(t)n_j^R(t) \leq Q_{ij} \\ \frac{Q_{ij}}{D_{ij}^L(t)n_i^L(t) + D_{ji}^L(t)n_j^L(t) + D_{ij}^R(t)n_i^R(t) + D_{ji}^R(t)n_j^R(t)} D_{ij}^L(t)n_i^L(t), & \text{otro caso} \end{cases} \quad (5) \quad \text{La}$$

tercera ecuación es para determinar los valores de peatones en cada celda, el valor $y_{ij}(t)$, se define como el número de peatones que se movieron de la celda i a la celda j en un intervalo de tiempo t .

$$y_{ij}(t) = \begin{cases} w_{ij}^L(t), & \sum_{k \in S_j^L} w_{kj}^L(t) \leq [\alpha^L(t)N_j - n_j^L(t)] \\ \frac{\alpha^L(t)N_j - n_j^L(t)}{\sum_{k \in S_j^L} w_{kj}^L(t)} w_{ij}^L(t), & \text{otros casos} \end{cases} \quad (6)$$

Con este último valor, se determinó la cantidad de celdas vacías o llenas para cada tiempo durante el periodo de embarque y desembarque del tren en estudio. Así mismo, se presentan los cambios en el escenario mientras el tiempo avanza graficados en una planta dibujada a escala de la estación del tren.

Por último, para que la función varíe en el tiempo para el valor de $n_i^L(t)$, se agregó una ecuación dependiente de datos de las celdas adyacentes.

$$n_i^L(t+1) = n_i^L(t) + \sum_{k \in S_i} y_{ki}^L(t) - \sum_{j \in R_i} y_{ij}^L(t) \quad (7)$$

El segundo modelo reduce de cierta forma la complejidad de las fórmulas debido a que el fenómeno de bidireccionalidad no afecta directamente al flujo de peatones, ya que se simula primero la bajada de los usuarios del tren y luego el embarque de los pasajeros hacia el vagón

en cuestión. Es por eso, que el valor de α ya no es considerado en las formulas para cada valor.

De esta manera, las nuevas ecuaciones vienen a ser las siguientes para cada valor en estudio:

$$D_{ij}(t) = \frac{(P_i - P_j)[N_j(t) - n_i(t)]}{\sum_{k \in R_i} \{(P_i - P_k)[N_k(t) - n_i(t)]\}} \quad (8)$$

$$w_{ij}(t) = \min\{D_{ij}(t)n_i(t), Q_{ij}(t)\} \quad (9)$$

$$y_{ij}(t) = \begin{cases} w_{ij}(t), & \sum_{k \in S_j} w_{kj}(t) \leq N_j(t) - n_j(t) \\ \frac{N_i(t) - n_j(t)}{\sum_{k \in S_j} w_{kj}(t)} w_{ij}(t), & \text{otro caso} \end{cases} \quad (10)$$

$$y_{ij}(t) = \min\left\{w_{ij}(t), \frac{N_i(t) - n_j(t)}{\sum_{k \in S_j} w_{kj}(t)} w_{ij}(t)\right\} \quad (11)$$

$$n_i(t + 1) = n_i(t) + \sum_{k \in S_i} y_{ki}(t) - \sum_{j \in R_i} y_{ij}(t) \quad (12)$$

5.2.1.1 Consideraciones

Las celdas que conforman el área de estudio muestran que, para cada puerta de embarque, las celdas que son de subida y bajada son simétricas entre sí, lo que dará como resultado los mismos tiempos de embarque y desembarque en caso de que sean la misma cantidad de peatones.

Los tiempos de reordenamiento para comenzar con la fase de embarque será considerado como el tiempo de bajada multiplicado por un factor de 1.25 que representa el tiempo para que los peatones que se encuentran en espera de abordar tomen su posición sobre las celdas de embarque frente a la puerta destino.

La variación de tiempo es por un segundo, dato que fue ajustado según los autores de Li Guo (2018), los cuales afecta a los parámetros Q y las funciones para cada tiempo, lo cual ya fue ajustado también en la presente investigación.

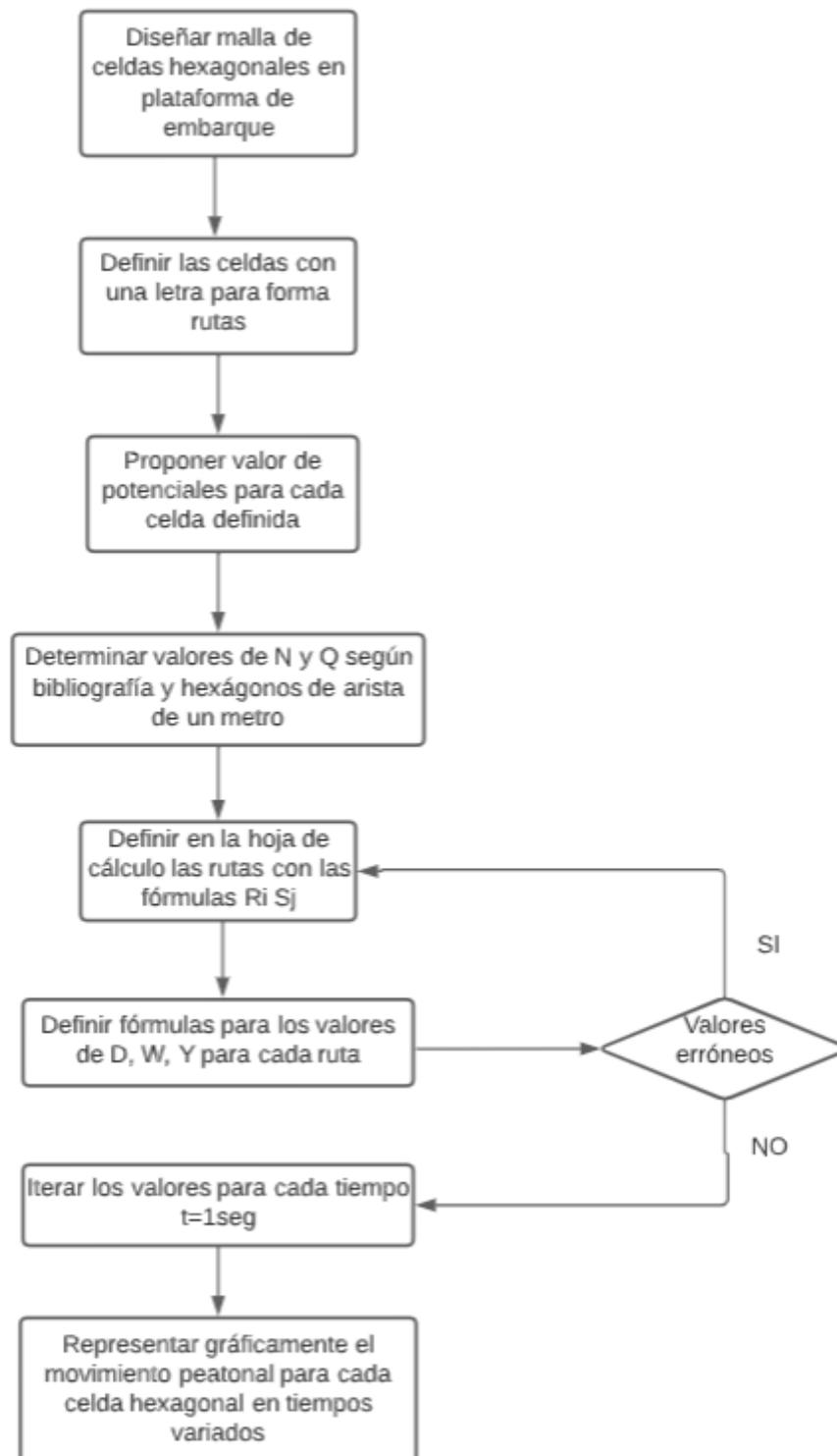


Figura 19: Flujograma del proceso de desarrollo del modelo CTM. Elaboración propia.

La figura 19, muestra el flujograma del proceso del desarrollo del modelo del flujo, este está apoyado con las hojas de cálculo en Excel (Ver anexo 4). Dando énfasis en el proceso de

iteración que toma tiempo ya que es necesario que se regule para que las ecuaciones no arrojen datos erróneos durante la simulación. De la misma forma la representación gráfica se hizo en el Excel tomando los datos de la tabla.

5.2.2 ESCENARIO GEOMÉTRICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

El proceso de embarque y desembarque de usuarios en el área de la plataforma de la línea uno del metro de Lima, es un escenario de simulación específico. En este escenario, se tiene una región rectangular de tamaño $B \times L$ y está dividida por una pared intermedia con un espesor de h . Hay una puerta con ancho w , que se consideró el cuello de botella, en medio de la pared. La parte inferior representa el área de espera que corresponde al andén y el lado superior representa el área de bajada del compartimiento del metro.

La región rectangular está completamente cubierta por celdas hexagonales regulares (Ver figura 17). Cuando el metro para en la estación es el momento inicial en las que los pasajeros se reúnen cerca de la puerta para poder descender (parte del rectángulo superior), y los pasajeros que están al otro lado, en el área del andén están a la espera de subir (parte inferior del rectángulo). Se consideró que los usuarios en el momento inicial se distribuyen uniformemente. Las celdas fronterizas correctas son destinos para aquellos pasajeros que desciende. De igual manera, las celdas del límite izquierdo son destinos para los pasajeros que embarcan. Después de que los usuarios de ambos lados atraviesan la puerta (cuello de botella), avanzan hasta llegar al límite opuesto es ahí donde se genera el conflicto de aglomeración.

Sea C el conjunto de celdas en todo el espacio peatonal, CL el conjunto de celdas del límite izquierdo, y PL_i el potencial de la celda i correspondiente el límite izquierdo “e”. Los potenciales de celdas se calcularán mediante el siguiente algoritmo en la cual se definirá mediante una serie de pasos, éstos son los siguientes:

Paso 1: Establecer $k=1$; para $\forall i \in C/CL$, establezca $PLi = 0$; para $\forall i \in CL$, establezca $PLj = 1$.

Paso 2: Para $\forall i \in C$ con $PLi = k$, verificar que todas sus celdas vecinas j : si las celdas i y j son conectivas y $PLj = 0$, entonces sea $PLj = k + 1$.

Paso 3: Compruebe si $\forall i \in C/Cn, PLi > 0$, luego vaya al paso 4; de lo contrario, establecer $k = k + 1$ y vaya al paso 2.

Paso 4: Establecer $k = 2$; Para $\forall i \in C$ con $PLi = 1$, establezca $PLi = 1$.

Paso 5: Para $\forall i \in C$ con $PLi = k$, verificar todas las celdas vecinas.

Sea $\Omega_i^L = \{j \mid \text{las celdas } i \text{ y } j \text{ son conectivas y } PLj = k - 1\}$.

Si $|\Omega_i^L| = 1$ y $j \in \Omega_i^L$, entonces establezca $PLi = PLj + 1$;

Si $|\Omega_i^L| > 1$, entonces establezca $PLi = \sum_{j \in \Omega_i^L} PLj / |\Omega_i^L| + \theta$ ($\theta \in (0,1]$, para este estudio $\theta = 0.75$).

Paso 6: Si $k = \max\{PLi \mid i \in C\}$, detener; de lo contrario, establezca $k = k + 1$ y vaya al paso 5.

Cabe señalar que la definición y cálculo del potencial de celda correspondiente al límite derecho de la celda i (denotado por PRi) es similar a PLi . Además, la celda contraria al límite derecho se define de la misma manera. (Ver figura 19)

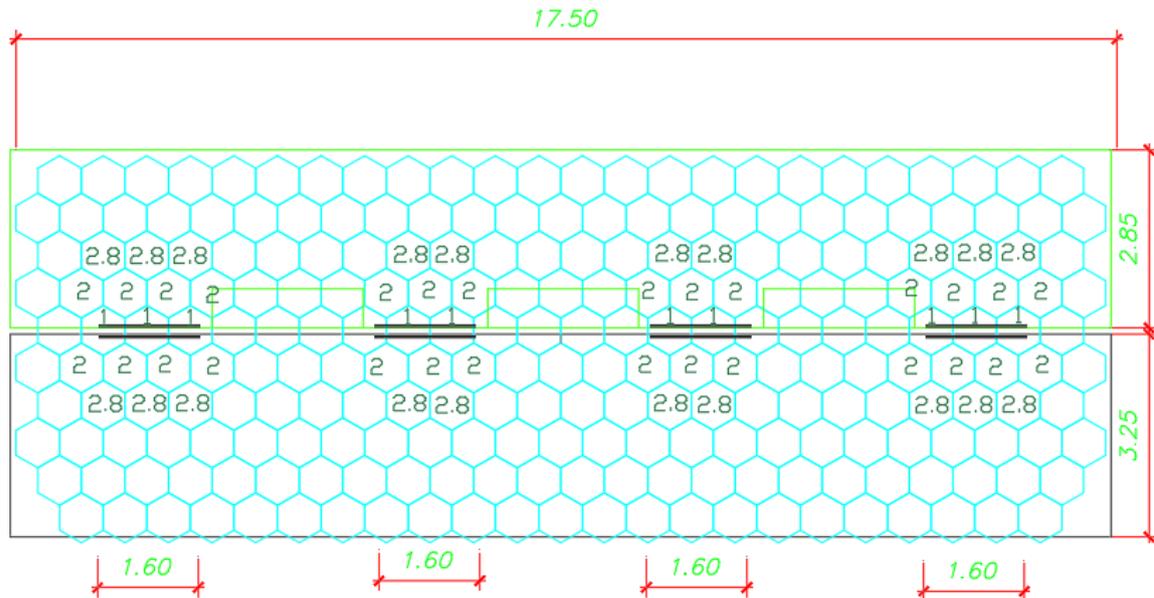


Figura 20: Espacio geométrico definido con potenciales de celdas en el área del andén y el área del vagón. Elaboración propia.

El parámetro de potencial es el primer dato para considerar dentro del modelo matemático. Esto debido a que este parámetro sirvió de guía para suponer el comportamiento de los peatones que se dirijan hacia un mismo punto en el área de diseño. El potencial indica la intención de cada celda al dirigirse al punto de encuentro que sería la puerta de embarque en el tren. De esta manera, se colocan números de manera creciente mientras más se aleje de las celdas correspondientes a la puerta de embarque. Estos potenciales indicaron la proximidad que tienen las celdas adyacentes hacia la ruta más corta elegida para la celda de encuentro. (Guo, Huang & Wong, 2011).

A continuación, se muestra el escenario de un vagón del tren interactuando con el área de embarque, con los potenciales colocados, para comenzar con la simulación del flujo peatonal representados por celdas en toda la superficie.

5.2.3 DESARROLLO

Una vez obtenidos los parámetros de simulación, se desarrolló el modelo en una hoja de cálculo del software Microsoft Excel, de tal manera que se siguieron las siguientes rutas con

la finalidad de conseguir como varían las densidades peatonales en cada celda a través de un tiempo “t” igual a un segundo.

Con los potenciales de cada celda ya calculados en un principio, se propusieron las rutas de evacuación con destino a las puertas de embarque del vagón. De esta manera, cada celda tuvo una ruta, un potencial, una letra para ser identificada y los parámetros iniciales N y Q. (Ver figura 19)

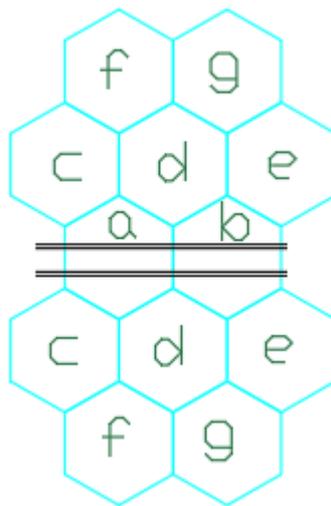


Figura 21: Identificación de letras en cada celda. Elaboración propia.

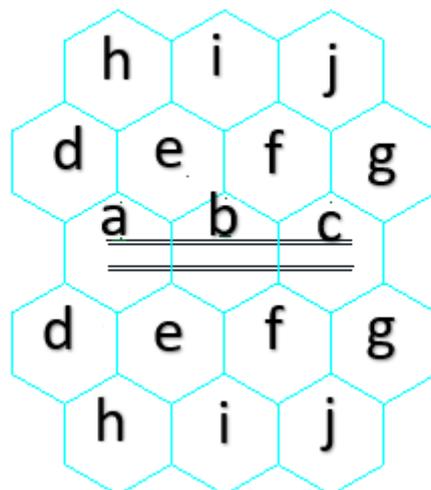


Figura 22: Identificación de letras en cada celda. Elaboración propia.

Para cada ruta propuesta en las puertas, se desarrollaron los cálculos de las funciones a través del tiempo inicial 0 como se muestra en la tabla 5. Estas funciones son D, w y Y que representan respectivamente un porcentaje de peatones que pueden cruzar entre celdas, los peatones que pueden cruzar y por último los peatones que cruzan durante el primer tiempo. Con estas funciones obtenidas para cada ruta sobre cada puerta, se habrá desarrollado los datos del tiempo inicial, los cuales fueron usados para comenzar con los cálculos de los datos para el tiempo siguiente. A continuación, se muestra el cálculo de las puertas 1 y 2 de un vagón y para mayor detalle (Ver anexo 4).

Datos:

Tabla 4.
Datos iniciales para el desarrollo del modelo

Datos	
N	3
Q	0.45
Año	2019
Pasajeros/puerta	9

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.
Tiempo que un usuario se demora en desembarcar de un vagón del tren

Celda	N(t)	Q(t)	P	n (0)	n (1)	n (2)	n (3)	n (4)	n (5)
a	15.00	0.45	1.00	0.0	0.8	1.6	2.2	2.7	2.7
b	15.00	0.45	1.00	0.0	0.9	1.8	2.7	3.5	3.5
c	15.00	0.45	1.00	0.0	0.8	1.6	2.2	2.7	2.7
d	3.00	0.34	2.00	1.0	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0
e	3.00	0.45	2.00	3.0	2.1	1.7	0.8	0.0	0.0
f	3.00	0.45	2.00	3.0	2.1	1.7	0.8	0.0	0.0
g	1.95	0.34	2.00	1.0	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0
h	3.00	0.45	2.80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
i	3.00	0.45	2.80	1.0	1.0	0.1	0.0	0.0	0.0
j	3.00	0.45	2.80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
z	3.00	0.45	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: Elaboración propia.

Dónde:

$N(t)$: Cantidad de peatones que la celda puede albergar

$Q(t)$: Cantidad de peatones que pueden atravesar

P : Valor potencial de la celda en el espacio geométrico considerado

$n(t)$: Cantidad de peatones que ocupan la celda en un tiempo t .

La celda denominada “z” se considerará como cualquier celda alrededor de las identificadas con letras minúsculas de la “a” a la “j”. Esto debido a que las celdas lejanas al modelo de embarque y desembarque no se conocen con exactitud su intención de movimiento, siendo esta dirección no posible calcular con el modelo matemático. Además, se necesita una celda vacía o sin nombrar para que represente una salida del flujo peatonal una vez atravesado el cuello de botella.

La tabla 4 muestra las características principales de las puertas laterales con sus valores de N y Q respectivos, también el año de estudio siendo el año 2019 donde la cantidad de pasajeros que atraviesan la puerta de embarque y desembarque en hora punta es de 9 aproximadamente. Así también, la tabla 5 detalla los resultados del modelo en hoja de cálculo, el cual muestra como el valor $n(t)$ varía con el tiempo cada una unidad de segundo. Comenzando con una cantidad de 3 peatones en las celdas e y f (celdas centrales y más cercanas a la puerta de embarque y desembarque), también con una cantidad de 1 peatón en las celdas d, g, i (celdas más próximas a la puerta y con valor potencial cercano).

De esta manera, la tabla 5 indica como hasta el tiempo 5, la cantidad de peatones se han reordenado hasta las celdas a,b y c (celdas que representan la puerta y el inicio del cuello de botella)

Se consideraron dos tipos de puertas según su ubicación en el vagón y las características de las celdas que se encuentran sobre el plano que representan. Siendo estas dos puertas

laterales y dos centrales, cada una de estas puertas con sus distintas celdas tanto de subida como de bajada con sus respectivas letras en las celdas. La figura 20 representa las puertas centrales, mientras la figura 21 representa las puertas laterales que cuentan con más espacio en el embarque al no encontrarse el área de asientos cerca a la puerta. Esto mismo se ve reflejado en la cantidad de celdas posicionadas en la puerta.

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se desarrolló el modelo de simulación de embarque y desembarque de tal manera que se cubrieran las cuatro puertas que corresponden a un vagón. Las ecuaciones desarrolladas en una hoja de cálculo con múltiples iteraciones para cada tiempo, dio como resultado un cuadro el cual representa la variación de la cantidad de peatones por tiempo para cada celda. De esta manera, se aprecia el resultado de la simulación para ambos casos de desarrollo, tanto para el año 2019 prepandemia, junto con los datos para el año 2020 con una reducción considerable en la demanda de la población del medio de transporte.

Se desarrolló el modelo considerando los datos proporcionados por la entidad encargada del funcionamiento del tren eléctrico. Siendo para el año 2019 un total de 9 personas por puerta y para el año 2020 un total de 4 personas por puerta. Las siguientes tablas muestran los tiempos totales de desembarque para las puertas considerando la variación de personas y agregando un tiempo de disipación luego de cruzar la puerta para dar paso a los peatones que se presentan al embarcar en el vagón correspondiente. (Ver tabla 6) Además, se realizó los mapas de calor para identificar el comportamiento del usuario en la plataforma de embarque y desembarque. (Ver anexo 5)

Tabla 6
Tiempos totales de desembarque en las puertas considerando la variación de personas con un tiempo de disipación al cruzar la puerta 1 y 4 con referencia del año 2020

Celda	N(t)	Q(t)	P	n (0)	n (1)	n (2)	n (3)	n (4)
a	15.00	0.45	1.00	0.0	0.5	0.9	1.0	1.0
b	15.00	0.45	1.00	0.0	0.9	1.8	2.0	2.0
c	15.00	0.45	1.00	0.0	0.5	0.9	1.0	1.0
d	3.00	0.34	2.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
e	3.00	0.45	2.00	2.0	1.1	0.2	0.0	0.0
f	3.00	0.45	2.00	2.0	1.1	0.2	0.0	0.0
g	1.95	0.34	2.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
h	3.00	0.45	2.80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
i	3.00	0.45	2.80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
j	3.00	0.45	2.80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
z	3.00	0.45	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: Elaboración propia

De la tabla 7, se puede analizar que de las puertas 1 y 4, el tiempo de disipación es de 3 segundos al culminar la etapa de desembarque. Es decir, las personas o usuarios del tren en el presente año demoran en promedio 3 segundos para desembarcar desde el vagón hacia la plataforma. Lo mismo sucede con las puertas 2 y 3, ya que el tiempo de disipación es la misma. (Ver tabla 7).

Tabla 7

Tiempos totales de desembarque en las puertas considerando la variación de personas con un tiempo de disipación al cruzar la puerta 2 y 3 con referencia del año 2020

Celda	N(t)	Q(t)	P	n (0)	n (1)	n (2)	n (3)	n (4)
a	15.00	0.45	1.00	0.0	0.5	0.9	1.0	1.0
b	15.00	0.45	1.00	0.0	0.9	1.8	2.0	2.0
c	15.00	0.45	1.00	0.0	0.5	0.9	1.0	1.0
d	3.00	0.34	2.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
e	3.00	0.45	2.00	2.0	1.1	0.2	0.0	0.0
f	3.00	0.45	2.00	2.0	1.1	0.2	0.0	0.0
g	1.95	0.34	2.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
h	3.00	0.45	2.80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
i	3.00	0.45	2.80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
j	3.00	0.45	2.80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
z	3.00	0.45	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: Elaboración propia

Ambas tablas muestran que el tiempo de salida de las puertas es de 3 segundos y a este tiempo se le añadió un tiempo de disipación y reordenamiento de 1.25 veces el tiempo de desembarque, el cual representa el tiempo que transcurre antes de comenzar el ciclo de embarque el cual al ser una planta simétrica tomará el mismo tiempo al tratarse de una demanda igual al de bajada del vagón. Siendo un total de 9.75 segundos aproximadamente el total de todo el ciclo de abordaje de las personas por puerta.

Este valor se obtiene sumando el valor de tiempo de bajada, tiempo de subida y reordenamiento. El tiempo de subida y bajada se obtiene de las hojas de cálculo del modelo, siendo aproximadamente 3 segundos cada uno como muestran la tabla 6 y tabla 7.

El valor de reordenamiento considerado fue de 1.25 veces el tiempo de subida, esto obtenido en el área de estudio Estación Angamos de la línea 1 del metro de Lima. Dato que fue

calculado durante una semana en hora punta (5:00pm a 7:00 pm) con cronómetro en los tiempos de reordenamiento promedio en las cuatro puertas por vagón.

$$T_{bajada} + T_{subida} + T_{reordenamiento} = 9.75$$

Tabla 8

Tiempos totales de desembarque en las puertas considerando la variación de personas con un tiempo de disipación al cruzar la puerta 1 y 4 con referencia del año 2019

Celda	N(t)	Q(t)	P	n (0)	n (1)	n (2)	n (3)	n (4)	n (5)	n (6)	n (7)
a	15.00	0.45	1.00	0.0	0.8	1.6	2.2	2.7	2.7	2.8	2.8
b	15.00	0.45	1.00	0.0	0.9	1.8	2.7	3.5	3.5	3.5	3.5
c	15.00	0.45	1.00	0.0	0.8	1.6	2.2	2.7	2.7	2.8	2.8
d	3.00	0.34	2.00	1.0	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
e	3.00	0.45	2.00	3.0	2.1	1.7	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0
f	3.00	0.45	2.00	3.0	2.1	1.7	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0
g	1.95	0.34	2.00	1.0	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
h	3.00	0.45	2.80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
i	3.00	0.45	2.80	1.0	1.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
j	3.00	0.45	2.80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
z	3.00	0.45	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: Elaboración propia

De la tabla 8, con una demanda de 9 pasajeros por puerta se analizó que los pasajeros tardan más al momento de desembarcar, con un tiempo de 7 segundos como un máximo, esto debido a que las puertas centrales son más estrechas y tienen obstaculización de los asientos del vagón.

Tabla 9

Tiempos totales de desembarque en las puertas considerando la variación de personas con un tiempo de disipación al cruzar la puerta 2 y 3 con referencia del año 2019

Celda	N(t)	Q(t)	P	n (0)	n (1)	n (2)	n (3)	n (4)	n (5)	n (6)	n (7)
a	15.00	0.45	1.00	0.0	0.9	1.8	2.7	3.6	4.3	4.4	4.4
b	15.00	0.45	1.00	0.0	0.9	1.8	2.7	3.6	4.3	4.4	4.4
c	3.00	0.45	2.00	2.0	1.6	1.1	0.7	0.2	0.0	0.0	0.0
d	3.00	0.45	2.00	3.0	2.1	2.0	1.6	1.0	0.3	0.1	0.1
e	2.40	0.45	2.00	2.0	1.6	1.1	0.7	0.2	0.0	0.0	0.0
f	3.00	0.45	2.80	1.0	1.0	0.6	0.4	0.3	0.1	0.1	0.0
g	3.00	0.45	2.80	1.0	1.0	0.6	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0
z	3.00	0.45	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de ambas tablas para el año 2019, cuentan con una demanda de 9 pasajeros. Sin embargo, las puertas 2 y 3 son las más estrechas generando que el tiempo de desembarque sea de 7 segundos. Es por ello por lo que la sumatoria final de los tiempos que conforman el ciclo completo resulta 22.75 segundos para cada puerta.

6.1 VALIDACIÓN

El proceso de la validación del modelo planteado se realizó de forma similar con la calibración. En este proceso se comparan tiempos de un vagón en hora pico en las puertas críticas que son la puerta 2 y 3 de nuestra simulación. Para la validación del modelo se debe tener en cuenta que los datos serán los mismos que los datos obtenidos por la AATU se verifica una variación del flujo peatonal en los años estudiados. (Ver anexo 2).

Es así como el área de estudio, concretamente el área de embarque de la Línea 1 del Tren eléctrico de Línea, fue visitada con la finalidad de obtener datos de tiempo del ciclo de embarque y la cantidad de peatones que demandan este medio de transporte por puerta en cada vagón. Esto se realizó durante la hora pico para simular un escenario de mayor demanda y con intención de buscar los valores iniciales máximos para el modelo.

La figura 11, muestra que durante la hora punta que transcurre entre las 6:00 pm y 7:00 pm las puertas de mayor demanda son las centrales de los seis vagones que conforman los trenes. Esto a su vez refleja la cantidad de usuarios que descienden y abordan el tren que es en promedio 2 y 4 respectivamente. También se identificó el tiempo promedio del ciclo completo de embarque, que corresponde a la suma de los tiempos de embarque, reordenamiento y desembarque, es de un tiempo aproximado de 9.70 segundos para esta demanda de usuarios. (Ver tabla 10).

Tabla 10

Datos tomados en campo de los tiempos promedios que dura un ciclo de embarque

Hora	Minutos de dif	Tiempo de ciclo de embarque	Und
05:54:00 p.m.	0	9	seg.
05:58:00 p.m.	4	8	seg.
06:00:00 p.m.	2	8	seg.
06:05:00 p.m.	5	9	seg.
06:07:00 p.m.	2	11	seg.
06:12:00 p.m.	5	16	seg.
06:14:00 p.m.	2	11	seg.
06:20:00 p.m.	6	9	seg.
06:23:00 p.m.	3	8	seg.
06:25:00 p.m.	2	6	seg.
06:30:00 p.m.	5	9	seg.
06:33:00 p.m.	3	12	seg.
06:36:00 p.m.	3	11	seg.
06:38:00 p.m.	2	8	seg.
06:42:00 p.m.	4	12	seg.
06:45:00 p.m.	3	10	seg.
06:49:00 p.m.	4	8	seg.
06:52:00 p.m.	3	12	seg.
06:56:00 p.m.	4	10	seg.
06:58:00 p.m.	2	8	seg.
07:01:00 p.m.	3	9	seg.
07:06:00 p.m.	5	10	seg.
07:09:00 p.m.	3	9	seg.
	Tiempo total		9.70 Seg.

Fuente: Elaboración propia.

Con los valores ya mencionados se inicia el proceso de modelación de las ecuaciones con ayuda de una hoja de cálculo como se ha explicado antes durante el desarrollo del modelo de simulación. Estos valores iniciales de peatones por puerta de vagón determinaron, a través del modelo propuesto, los tiempos tanto de subida como bajada en la estación de estudio.

Tabla 11

Datos iniciales de las puertas 1 y 4

N	3
Q	0.45
Año	2020
Pasajero/puerta	4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12

Desarrollo del modelo con los tiempos que se demora en embarque en las puertas 1 y 4

Celda	n (0)	n (1)	n (2)	n (3)	n (4)
a	0.0	0.5	0.9	1.0	1.0
b	0.0	0.9	1.8	2.0	2.0
c	0.0	0.5	0.9	1.0	1.0
d	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
e	2.0	1.1	0.2	0.0	0.0
f	2.0	1.1	0.2	0.0	0.0
g	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
h	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
i	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
j	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
z	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13

Datos iniciales de las puertas 2 y 3

N	3
Q	0.45
Año	2020
Pasajero/puerta	4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14

Desarrollo del modelo con los tiempos que se demora en embarque en las puertas 2 y 3

Celda	n (0)	n (1)	n (2)	n (3)	n (4)
a	0.0	0.9	1.8	2.0	2.0
b	0.0	0.9	1.8	2.0	2.0
c	1.0	0.6	0.1	0.0	0.0
d	2.0	1.1	0.2	0.0	0.0
e	1.0	0.6	0.1	0.0	0.0
f	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
g	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
z	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: Elaboración propia.

Las tablas 12 y 14, dan como resultado los tiempos aproximados de embarque para las 4 puertas del vagón, esto siendo 3 segundos que tardan los 4 peatones en atravesar la puerta en cuestión.

Tabla 15

Datos iniciales de las puertas 1 y 4

N	3
Q	0.45
Año	2021
Pasajero/puerta	2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16

Desarrollo del modelo con los tiempos que se demora en embarque en las puertas 1 y 4

Celda	n (0)	n (1)	n (2)	n (3)	n (4)
a	0.0	0.5	0.5	0.5	0.5
b	0.0	0.9	1.0	1.0	1.0
c	0.0	0.5	0.5	0.5	0.5
d	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
e	1.0	0.1	0.0	0.0	0.0
f	1.0	0.1	0.0	0.0	0.0
g	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
h	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
i	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
j	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
z	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17

Datos iniciales de las puertas 2 y 3

N	3
Q	0.45
Año	2021
Pasajero/puerta	2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18

Desarrollo del modelo con los tiempos que se demora en embarque en las puertas 2 y 3

Celda	n (0)	n (1)	n (2)	n (3)	n (4)
a	0.0	0.5	0.9	1.0	1.0
b	0.0	0.5	0.9	1.0	1.0
c	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
d	2.0	1.1	0.2	0.0	0.0
e	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
f	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
g	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
z	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: Elaboración propia

Los tiempos de desembarque para las cuatro puertas son un aproximado de 3 segundos como máximo en las puertas centrales, puertas por las cuales descienden 2 peatones según los datos recolectados en campo, esta información se encuentra en las tablas 16 y 18.

De esta manera, considerando el tiempo de reordenamiento que ocurre entre los tiempos de embarque y desembarque, el tiempo total del ciclo sería de un aproximado de 9.75 seg.

Una vez obtenidos los tiempos del modelo serán comparados e evaluados con los tiempos tomados en campo para verificar si existe la confiabilidad necesaria para usarse el modelo de forma segura. Estos datos se muestran en la tabla 19, detallando de la también la cantidad de usuarios que embarcan y desembarcan de manera que el ciclo completo se pueda calcular en el modelo.

Tabla 19
Tiempos tomados en campo

Hora	Usuarios por puerta	Tiempo en campo (.seg)	Tiempo del modelo (.seg)
17:54:00	6	9	9.75
17:58:00	6	8	9.75
18:00:00	6	8	9.75
18:05:00	6	9	9.75
18:07:00	6	11	9.75
18:12:00	6	16	9.75
18:14:00	6	11	9.75
18:20:00	6	9	9.75
18:23:00	6	8	9.75
18:25:00	6	6	9.75
18:30:00	6	9	9.75
18:33:00	6	12	9.75
18:36:00	6	11	9.75
18:38:00	6	8	9.75
18:42:00	6	12	9.75
18:45:00	6	10	9.75
18:49:00	6	8	9.75
18:52:00	6	12	9.75
18:56:00	6	10	9.75
18:58:00	6	8	9.75
19:01:00	6	9	9.75
19:06:00	6	10	9.75
19:09:00	6	9	9.75
Tamaño		23	23
Media		9.70	9.75
Desv. Estandar		2	0

Fuente: Elaboración propia

Haciendo uso de la herramienta Statkey, los datos de tiempos ordenados serán validados a través del análisis estadístico de dos muestras llamado “Randomization Test for a difference in Means”. El cual indica si la diferencia de medias se encuentra o no dentro del intervalo de confianza asumido de 95%.

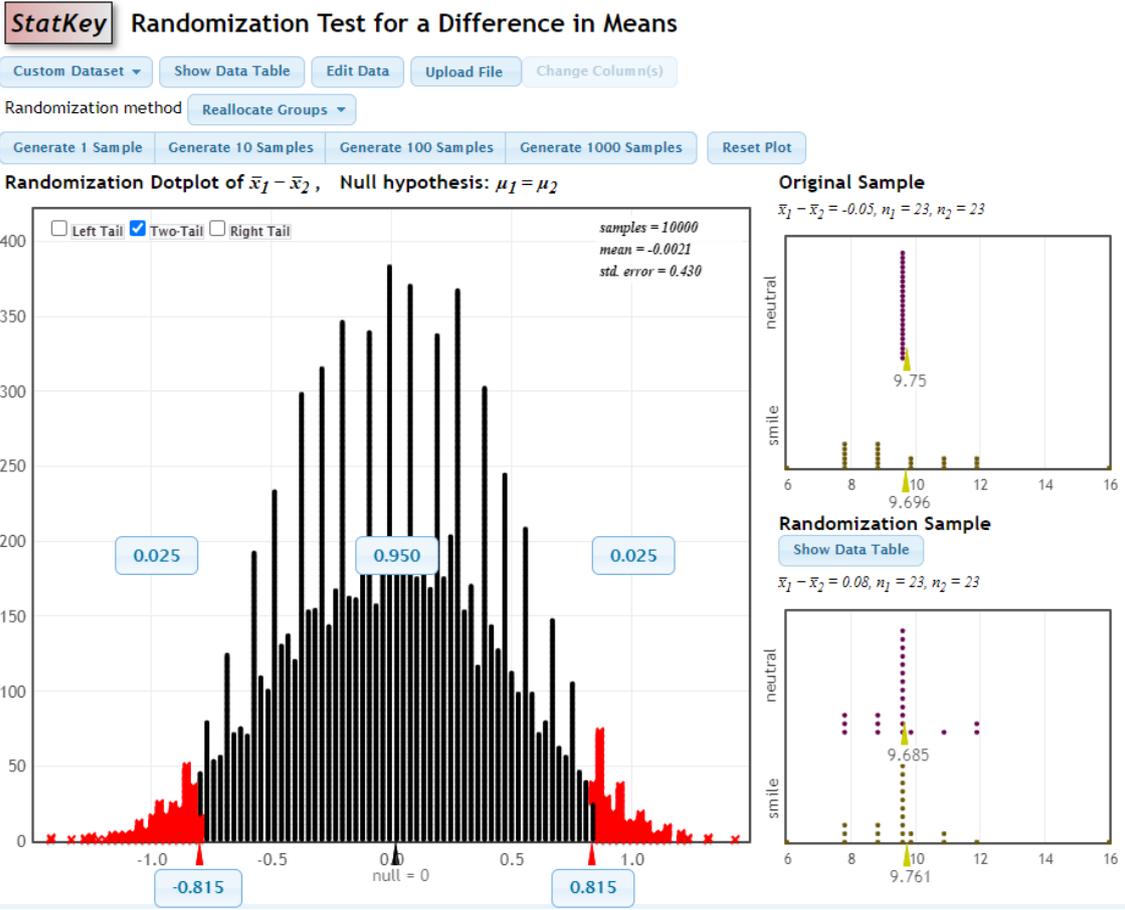


Figura 23: Resultados de confiabilidad en statkey. Elaboración propia.

Finalmente, los resultados que se muestran en la figura 22, indica que el modelo propuesto en la investigación provee una confiabilidad en los resultados de un 95% como mínimo, debido a que la diferencia de medias es de 0.05, valor que se encuentra dentro del intervalo de confianza.

7 CONCLUSIONES

La investigación realizada en busca de un modelo para simular flujos demostró que existen diversas alternativas para simular una evacuación en un escenario específico. Sin embargo, estos en su mayoría se enfocan en simular los flujos peatonales en una sola dirección y en áreas abiertas. De la misma forma, buscan conocer el movimiento de los peatones en un entorno de infraestructura vial, esto con la finalidad de enfocarse en un diseño geométrico que satisfaga al usuario.

Las técnicas existentes respecto a la simulación del flujo peatonal se basan principalmente en variables tales como anisotropía y aleatoriedad esto con la intención de semejar los movimientos en función al tiempo. Lo que proporciona un enfoque macroscópico de los usuarios con respecto al área de estudio. Así mismo, los softwares de simulación tienen limitaciones respecto al uso de las licencias y la complejidad del uso de estos. Por ende, se optó por el uso del modelo CTM debido a las comparaciones ya antes mencionadas y principalmente porque brinda la facilidad de disponer de un plano del escenario para su desarrollo. Lo que lo destaca en la capacidad de ser moldeado en el escenario seleccionado.

El Modelo de Trasmisión de Celdas es un modelo en el que genera distintas variables y permite simular el movimiento de celdas. Sin embargo, las diversas formas geométricas no simulan los movimientos correctos versus la forma hexagonal que tiene una mejor adecuación del movimiento de las personas. La forma geométrica hexagonal considerada en los cuellos de botella (puertas) se encuentra ubicada en sentido transversal de la ubicación de la puerta. Lo que permite el movimiento en dos sentidos. Es decir, que las personas embarcan o desembarcan de forma diagonal asemejando mejor el estado de evacuación. Así mismo, el enmallado dentro del plano

en planta de la plataforma presenta obstáculos de los cuales son considerados para la simulación debido a que restringe los movimientos en ciertas celdas y direcciones. Por otro lado, el modelo de flujo en busca de ser usado con los datos de demanda por vagón también puede ser ajustado en caso existan vagones que no cumplan con las mismas características ya sea las puertas con los anchos distintos.

El desarrollo del modelo para la plataforma de embarque arrojó tiempos que se encuentran dentro de un margen real al ser comparados con los obtenidos en campo bajo las mismas condiciones (demanda en hora punta en la estación seleccionada). Obteniendo un 95% de grado de confiabilidad lo permite aplicar el modelo en otras plataformas con las mismas características y valores de N y Q para mallas hexagonales de un metro de arista. Para validar la confiabilidad de los resultados, se comparó los resultados de 9.75 segundos de una puerta con 6 usuarios que el modelo plantea en relación con los tiempos que se obtuvieron en el área de estudio durante una hora punta en donde el promedio en segundos es de 9.70.

8 RECOMENDACIONES

Se recomienda investigar la tipología de los trenes con similares características para la evaluación y posible análisis del modelo CTM. Para ajustar el modelo con respecto al diseño del tren de preferencia que haga que una futura investigación se evalúe con las dimensiones del tren seleccionado.

Así mismo es recomendable, aplicar un mayor estudio en estaciones de mayor demanda para simular el caso mas desfavorable respecto a la evacuación continua de pasajeros, porque la estación Angamos al ser concurrida disminuye su demanda por vagón al tener una mayor frecuencia de llegada de trenes.

Los softwares basados en lenguaje de programación como lo es Python reducirían en gran medida el desarrollo de ecuaciones matemáticas en hojas de cálculo y haría que el modelo sea más interactivo, por lo que su uso en vista de mejora se recomienda.

En vista de que el modelo dio resultados confiables en tiempos de evacuación. Se recomienda el uso del modelo en investigaciones con un enfoque a la seguridad peatonal en situaciones de evacuación masiva.

9 REFERENCIAS

- Alizadeh, R. (2011). A Dynamic Cellular Automaton Model for Evacuation Process with Obstacles. *Safety Science* 49 (2): 315–323.
- Asano, M., Sumalee, A., Kuwahara., M & Tanaka., A. (2007). Dynamic Cell Transmission-Based Pedestrian Model with Multidirectional Flows and Strategic Route Choices. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 1710: 28–36.
- Blue, V., & Adler, J. (2001). Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways. *Transportation Research Part B: Methodological*. 35(3), pp. 293–312.
- Dubroca, M., Kabalan, B., Leurent, F. (2019). On pedestrian traffic management in railway stations: simulation needs and model assessment. *Transportation Research Procedia*. 37 (2): 3-10.
- Daganzo, C. (1995). The cell transmission model, part ii: network traffic. *Transportation Research Part B: Methodological*. 29(2), pp. 79–93.
- Daganzo, CF. (1994). The Cell Transmission Model: A Simple Dynamic Representation of Highway Traffic. *Transportation Research Part B: Methodological* 28: 269– 287.
- Daganzo, CF. (1995). The Cell Transmission Model, Part II: Network Traffic. *Transportation Research Part B: Methodological* 28 (2): 79–93.
- Gao, Z., Qu, Y., Li, X., Long, J., & Huang., H. (2014). Simulating the Dynamic Escape Process in Large Public Places. *Operations Research*, 62 (6): 1344–1357.
- Garcimartín, A., Pastor, M., Gómez, M., Parisi, D., & Zuriguel, I. (2017). Pedestrian collective motion in competitive room evacuation. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi:10.1038/s41598-017-11197-x>.
- Gonzales, J. (2011). Estudio de modelos para tráfico peatonal y su aplicación a pasillos en diferentes escenarios [Título profesional, Universidad Autónoma Metropolitana].

Repositorio académico de la Universidad Autónoma Metropolitana.

<http://mat.izt.uam.mx/mcmai/documentos/tesis/Gen.08-O/Gonzalez-JD-Tesis.pdf>

Guo, R. Y., Huang, H. J., & Wong, S. C. (2011). Collection, spillback, and dissipation in pedestrian evacuation: A network-based method. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(3), 490–506. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2010.09.009>

Guo, RY. (2014). New Insights into Discretization Effects in Cellular Automata Models for Pedestrian Evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 400:1–11.

Gwizdalla, T. M. (2015). Some properties of the floor field cellular automata evacuation model. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 419, 718–728. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.10.070>

Henderson, L. F. (1974). On the fluid mechanics of human crowd motion. *Transportation Research*, 8(6), 509–515. doi:10.1016/0041-1647(74)90027-6

Hoogendoorn S., & Bovy, P. (2004). Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. *Transportation Research Part B*, 38(2): 169-190.

Jiang, Y., Xiong, T., Wong, S., Shu, C., Zhang, M., Zhang, P., & Lam, W. (2009). A reactive dynamic continuum user equilibrium model for bi-directional pedestrian flows. *Acta Mathematica Scientia*, 29(6):1541-1555.

Li, H., Zhang, J., Song, W., & Yuen, K. K. R. (2020). A comparative study on the bottleneck pedestrian flow under different movement motivations. *Fire Safety Journal*, (May), 103014. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103014>

Li, N., & Guo, R. Y. (2020). Simulation of bi-directional pedestrian flow through a bottleneck: Cell transmission model. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 555(xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.124542>

Luo, L., Liu, X., Fu, Z., Ma, J., & Liu, F. (2020). Modeling following behavior and right-side-preference in multidirectional pedestrian flows by modified FFCA. *Physica A:*

Statistical Mechanics and Its Applications, 550(xxxx), 124149.
<https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.124149>

Martinez-Gil, F., Lozano, M., & Fernández, F. (2017). Emergent behaviors and scalability for multi-agent reinforcement learning-based pedestrian models. *Simulation Modelling Practice and Theory*, (74), 117-133.

Rupprecht, T., Klingsch, W., & Seyfried, A. (2011). Influence of Geometry Parameters on Pedestrian Flow through Bottleneck. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, 71–80.
https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9725-8_7.

Senevarante P. & Morall J. Analysis of factors affecting the choice of route of pedestrians. *Transportation Planning and Technology*, 10(2):147-159.

Sun, Y. (2019). Simulations of bi-direction pedestrian flow using kinetic Monte Carlo methods. *Physica A*, 524, 519-531. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.04.081>

Teknomo, K. (2002). Microscopic pedestrian flow characteristics: Development of an image processing data collection and simulation model. Diss. Tohoku Univ.

Tak, S., Kim, S., & Yeo, H. (2017). Agent-based pedestrian cell transmission model for evacuation. *Transportmetrica A: Transport Science*, 14(5), 484–502.
<https://doi.org/10.1080/23249935.2017.1280559>

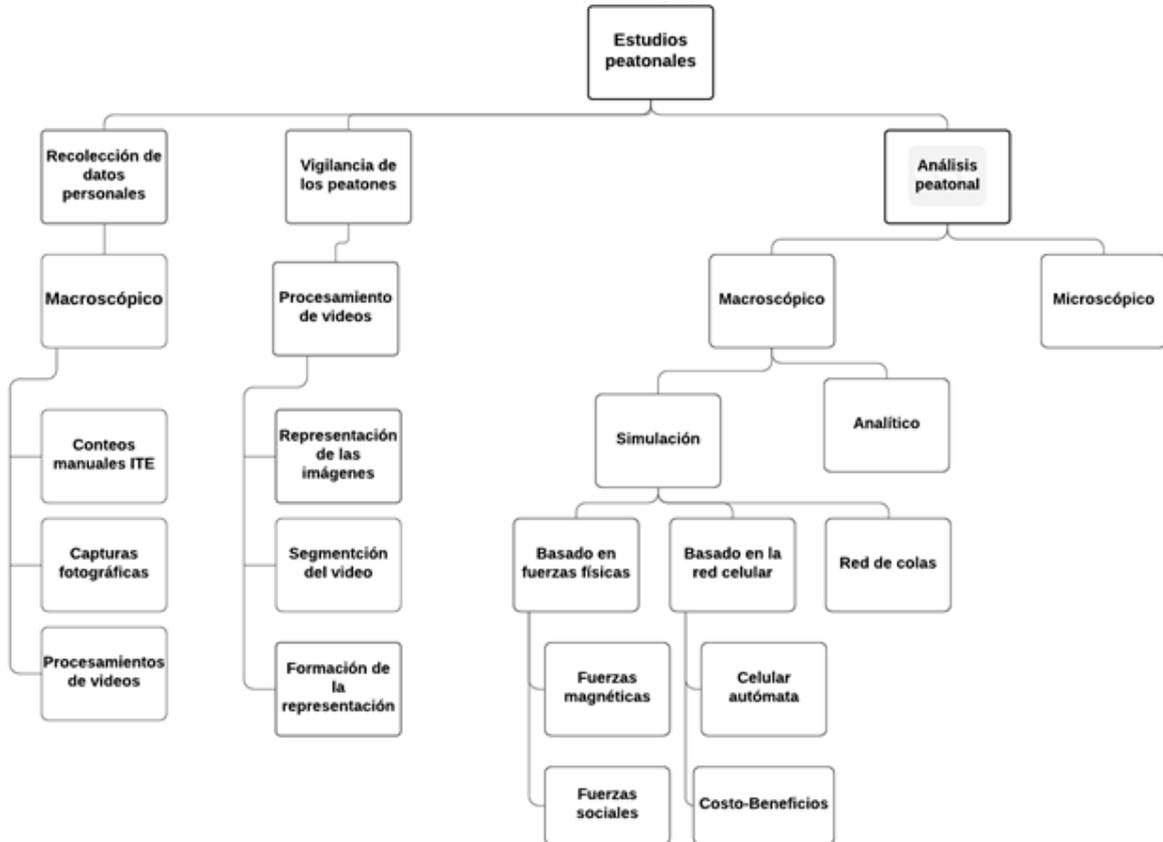
Xu, H. H., & Guo, R. Y. (2018). Simulation of bi-directional pedestrian flow by using a cell transmission model. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 87, 1–14.
<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.05.012>

Zhang, Y., Su, R., & Zhang, Y. (2017). A macroscopic propagation model for bidirectional pedestrian flows on signalized crosswalks. 2017 IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control, CDC 2017, 2018-January (Cdc), 6289–6294.
<https://doi.org/10.1109/CDC.2017.8264607>

Zhao, J., Malenje, J. O., Wu, J., & Ma, R. (2020). Modeling the interaction between vehicle yielding and pedestrian crossing behavior at unsignalized midblock crosswalks. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 73, 222–235. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2020.06.019>

10 ANEXOS

Anexo 1: Metodología para el estudio de peatones. Adaptado de Teknomo (2002).



Anexo 2: Demanda promedio en día hábil 2019 y 2020 – Estación Angamos. Adaptado de ATU.

Intervalos de hora	2019											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Promedio de 06:00 - 07:00	249	257	311	336	310	315	306	322	348	362	369	337
Promedio de 07:00 - 08:00	705	743	838	883	898	898	906	966	1,001	983	1,008	935
Promedio de 08:00 - 09:00	692	752	789	816	815	811	838	863	902	898	932	931
Promedio de 09:00 - 10:00	699	736	778	797	803	798	805	862	866	855	903	930
Promedio de 10:00 - 11:00	756	809	811	823	851	850	864	906	899	937	991	1,016
Promedio de 11:00 - 12:00	838	889	920	931	979	981	952	1,000	980	1,037	1,066	1,084
Promedio de 12:00 - 13:00	939	1,004	986	1,058	1,062	1,054	1,087	1,143	1,118	1,121	1,158	1,216
Promedio de 13:00 - 14:00	971	1,027	1,154	1,273	1,263	1,264	1,246	1,353	1,380	1,346	1,337	1,414
Promedio de 14:00 - 15:00	933	1,010	1,032	1,134	1,225	1,239	1,235	1,292	1,271	1,278	1,312	1,490
Promedio de 15:00 - 16:00	1,138	1,216	1,285	1,361	1,396	1,445	1,473	1,546	1,527	1,554	1,585	1,713
Promedio de 16:00 - 17:00	1,502	1,628	1,780	1,893	2,006	2,030	2,061	2,107	2,095	2,170	2,128	2,216
Promedio de 17:00 - 18:00	2,441	2,667	2,884	3,094	3,018	3,047	3,007	3,124	3,221	3,267	3,205	3,098
Promedio de 18:00 - 19:00	3,350	3,630	3,794	4,023	4,006	3,521	3,861	4,363	4,432	4,491	4,291	4,131
Promedio de 19:00 - 20:00	2,995	3,217	3,471	3,759	3,798	3,535	3,558	4,044	3,972	4,008	4,181	3,869
Promedio de 20:00 - 21:00	2,294	2,474	2,608	2,832	2,939	2,987	2,831	3,196	3,066	3,033	3,123	3,132
Promedio de 21:00 - 22:00	2,346	2,538	2,681	2,929	3,106	3,105	3,114	3,650	3,298	3,381	3,358	3,423

Intervalos de hora	2020											
	Enero	Febrero	Marzo*	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Promedio de 06:00 - 07:00	311	328	249	205	188	187	182	170	193	197	200	219
Promedio de 07:00 - 08:00	910	927	690	313	301	291	315	322	307	294	311	356
Promedio de 08:00 - 09:00	908	933	615	278	281	290	280	302	301	292	298	336
Promedio de 09:00 - 10:00	902	902	553	231	292	283	288	282	289	283	298	369
Promedio de 10:00 - 11:00	1,038	1,020	590	231	275	260	266	268	263	257	276	376
Promedio de 11:00 - 12:00	1,103	1,121	620	258	321	344	368	358	338	337	282	413
Promedio de 12:00 - 13:00	1,230	1,233	669	279	340	407	358	328	322	318	326	445
Promedio de 13:00 - 14:00	1,339	1,373	772	320	380	402	375	359	347	332	347	488
Promedio de 14:00 - 15:00	1,341	1,386	826	510	447	419	388	375	378	365	374	521
Promedio de 15:00 - 16:00	1,585	1,611	959	700	517	415	407	408	413	405	407	621
Promedio de 16:00 - 17:00	2,129	2,206	1,425	1,004	713	460	457	454	456	450	457	782
Promedio de 17:00 - 18:00	3,272	3,380	1,928	468	686	576	640	708	618	567	572	1,005
Promedio de 18:00 - 19:00	4,585	4,827	2,230	12	560	665	731	807	686	613	655	1,074
Promedio de 19:00 - 20:00	4,153	4,270	1,923	0	251	541	675	808	690	630	682	1,060
Promedio de 20:00 - 21:00	3,164	3,396	1,449	0	77	347	499	738	663	624	646	893
Promedio de 21:00 - 22:00	3,254	2,433	1,084	0	3	64	259	258	350	383	442	679

* 16 de marzo inicio de pandemia.

Anexo 3: Demanda de viajes en la hora pico en días hábiles 2019-2020.

DEMANDA PROMEDIO EN DÍA HÁBIL 2019 – ESTACIÓN ANGAMOS												
Intervalos de hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Promedio de 06:00 - 07:00	249	257	311	336	310	315	306	322	348	362	369	337
Promedio de 07:00 - 08:00	705	743	838	883	898	898	906	966	1,001	983	1,008	935
Promedio de 08:00 - 09:00	692	752	789	816	815	811	838	863	902	898	932	931
Promedio de 09:00 - 10:00	699	736	778	797	803	798	805	862	866	855	903	930
Promedio de 10:00 - 11:00	756	809	811	823	851	850	864	906	899	937	991	1,016
Promedio de 11:00 - 12:00	838	889	920	931	979	981	952	1,000	980	1,037	1,066	1,084
Promedio de 12:00 - 13:00	939	1,004	986	1,058	1,062	1,054	1,087	1,143	1,118	1,121	1,158	1,216
Promedio de 13:00 - 14:00	971	1,027	1,154	1,273	1,263	1,264	1,246	1,353	1,380	1,346	1,337	1,414
Promedio de 14:00 - 15:00	933	1,010	1,032	1,134	1,225	1,239	1,235	1,292	1,271	1,278	1,312	1,490
Promedio de 15:00 - 16:00	1,138	1,216	1,285	1,361	1,396	1,445	1,473	1,546	1,527	1,554	1,585	1,713
Promedio de 16:00 - 17:00	1,502	1,628	1,780	1,893	2,006	2,030	2,061	2,107	2,095	2,170	2,128	2,216
Promedio de 17:00 - 18:00	2,441	2,667	2,884	3,094	3,018	3,047	3,007	3,124	3,221	3,267	3,205	3,098
Promedio de 18:00 - 19:00	3,350	3,630	3,794	4,023	4,006	3,521	3,861	4,363	4,432	4,491	4,291	4,131
Promedio de 19:00 - 20:00	2,995	3,217	3,471	3,759	3,798	3,535	3,558	4,044	3,972	4,008	4,181	3,869
Promedio de 20:00 - 21:00	2,294	2,474	2,608	2,832	2,939	2,987	2,831	3,196	3,066	3,033	3,123	3,132
Promedio de 21:00 - 22:00	2,346	2,538	2,681	2,929	3,106	3,105	3,114	3,650	3,298	3,381	3,358	3,423
Descripción	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
c/3min	168	182	190	201	200	176	193	218	222	225	215	207
Usuarios por vagón	28	30	32	34	33	29	32	36	37	37	36	34
Usuarios por puerta	7	8	8	8	8	7	8	9	9	9	9	9

DEMANDA PROMEDIO EN DÍA HÁBIL 2020 – ESTACIÓN ANGAMOS												
Intervalos de hora	Enero	Febrero	Marzo**	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Promedio de 06:00 - 07:00	311	328	249	205	188	187	182	170	193	197	200	219
Promedio de 07:00 - 08:00	910	927	690	313	301	291	315	322	307	294	311	356
Promedio de 08:00 - 09:00	908	933	615	278	281	290	280	302	301	292	298	336
Promedio de 09:00 - 10:00	902	902	553	231	292	283	288	282	289	283	298	369
Promedio de 10:00 - 11:00	1038	1020	590	231	275	260	266	268	263	257	276	376
Promedio de 11:00 - 12:00	1103	1121	620	258	321	344	368	358	338	337	282	413
Promedio de 12:00 - 13:00	1230	1,233	669	279	340	407	358	328	322	318	326	445
Promedio de 13:00 - 14:00	1339	1,373	772	320	380	402	375	359	347	332	347	488
Promedio de 14:00 - 15:00	1341	1,386	826	510	447	419	388	375	378	365	374	521
Promedio de 15:00 - 16:00	1585	1611	959	700	517	415	407	408	413	405	407	621
Promedio de 16:00 - 17:00	2129	2206	1425	1004	713	460	457	454	456	450	457	782
Promedio de 17:00 - 18:00	3272	3380	1928	468	686	576	640	708	618	567	572	1005
Promedio de 18:00 - 19:00	4585	4827	2230	12	560	665	731	807	686	613	655	1074
Promedio de 19:00 - 20:00	4153	4270	1923	0	251	541	675	808	690	630	682	1060
Promedio de 20:00 - 21:00	3164	3396	1449	0	77	347	499	738	663	624	646	893
Promedio de 21:00 - 22:00	3254	2,433	1084	0	3	64	259	258	350	383	442	679
Frecuencia	Enero	Febrero	Marzo**	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Frecuencia c/6min	459	483	223	1	56	67	73	81	69	61	66	107
Usuarios por vagón	76	80	37	0	9	11	12	13	11	10	11	18
Usuarios por puerta	19	20	9	0	2	3	3	3	3	3	3	4

Anexo 4: Desarrollo del modelo CTM para un tiempo 2.

Ruta:	Ri	Sj									
	a	e									
	b	f									
Deb (0) =	Pk	Pi	Nk	nk	SUM	Pi	Pj	Nj(t)	nj(t)		
	1	2	15	0.9	14.1	2	1	15	1.8		
	1	2	15	1.8	13.2						
						27.3					
wij(t) =						Dij(t)	ni(t)	Qij(t)			
						0.4835	0.2	0.45			
yij(t)=	wij(t)	Nj(t)	nj(t)								
	0.0967	15	1.8								
Deb (t)=						KeSj	j	Pi	Pj	Nj(t)	nj(t)
Dfb (t)=						e	b	2	1	15	1.8
						f	b	2	1	15	1.8
Ri = j = k	Nk	nk	SUM	ni(t)		Qij(t)					
b	15	1.8	13.2	0.2		0.45					
c	15	0.9	14.1								
				27.3							
Ri = j = k	Nk	nk	SUM	ni(t)		Qij(t)					
a	15	0.9	14.1	0.2		0.45					
b	15	1.8	13.2								
				27.3							

Anexo 5: Mapas de calor en intervalos de tiempo.

