



INSTITUTO TÉCNICO AUTÓNOMO DE MÉXICO

SIMULACIÓN
EST-24107

Congestión de personas en CETRAM San Lázaro

Alumnos :

Maximiliano Medina 166099
Gerardo Pastrana 166912
Mariana Pérez-Cong 170891
Nicole Serratos 171242

Profesor:

Jorge De la Vega Góngora

Diciembre 6, 2019

Índice

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 2 |
| 1.1. Alcance | 2 |
| 1.2. Supuestos | 3 |
| 2. Datos | 3 |
| 2.1. Variables utilizadas | 4 |
| 3. Métodos | 6 |
| 3.1. Ajuste del parámetro de intensidad | 6 |
| 3.2. Cálculo del número de personas esperando | 9 |
| 4. Resultados | 9 |
| 4.1. Reducir tiempo entre trenes | 11 |
| 4.2. En la hora pico mandar un tren vacío cada tres trenes | 11 |
| 4.3. Un vagón vacío en horas pico | 12 |
| 5. Conclusiones | 13 |
| 6. Fuentes | 15 |
| 7. Anexos | 16 |

Simulación del flujo de personas en San Lázaro

22 de junio de 2020

1. Introducción

Cada día miles de personas parten desde la perifería de la zona metropolitana con destino al centro de la Ciudad de México, generalmente para llegar a sus trabajos. La estación de metro que reúne la mayoría de estos viajeros es San Lázaro. Esto se debe a su cercanía a la estación de autobuses «La Tapo», además de que es conexión entre Ecatepec hasta Observatorio por medio de las líneas B y 1. Esto ha ocasionado un flujo masivo de personas, el cual es significativamente mayor a la capacidad de los trenes. En consecuencia, los usuarios del metro se ven afectados con tiempos de espera muy largos.

En el análisis del flujo de personas en San Lázaro existen dos casos relevantes:

1. Aquellos que toman la línea B partiendo de Ecatepec con dirección a Buenavista y hacen un transbordo en la estación de San Lázaro para tomar la línea 1 rumbo a Observatorio.
2. Las personas que provienen de la calle. Esto incluye tanto a las personas que comienzan su viaje desde San Lázaro, como a las personas que llegan desde la estación de autobuses «La Tapo».

El metro de la línea 1 llega a San Lázaro lleno de las personas que lo toman en Pantitlán. Junto con los usuarios que desean subir a él desde Sán Lazaro, el tren excede su máxima capacidad en hasta 500 personas. Esto desagiliza la movilización y hace que el metro demore más en llegar, por lo que el número personas esperando se acumula cada vez más. Para hacer frente a este problema, el gobierno de la Ciudad de México intentó colocar una barrera de policías durante las horas pico en el puente de transbordo y fuera de la estación de metro. La intención de esta medida era que los policías dejaran pasar aproximadamente 200 personas cada 144 segundos pues este era el número de lugares que se desocupaban en el tren cuando llegaba a San Lázaro. Sin embargo, esto solo ha desagilizado el flujo y ha añadido un mayor caos al pandemonio. Su fracaso se debió a que el número de personas que se dejaban pasar era tan solo una estimación sin fundamento y el tren terminaba excediendo su capacidad, lo cual lo alentaba aún más.

1.1. Alcance

En este trabajo se buscará modelar el flujo de personas que desean tomar el tren de la línea 1 rumbo a Observatorio tomando en cuenta tanto las personas que transbordan

desde la línea B como las personas que provienen desde afuera de estación. Además, se modelará la salida de personas del tren de la línea 1, es decir, los lugares que se pueden ocupar por los usuarios esperando a ascender. De esta manera, se podrá simular el número de personas que logran subirse al tren, así como el tiempo de espera promedio.

El objetivo es conocer de manera acertada el flujo en el tiempo para poder proponer soluciones a la congestión en las horas pico y agilizar el movimiento de los trenes. Con base en lo anterior, se analizarán tres propuestas y se examinarán sus efectos sobre el tiempo de espera promedio, así como sus implicaciones prácticas con el fin de encontrar una solución viable y de alto impacto.

De esta manera, se mejorará la experiencia de usuario en el metro de la Ciudad de México .

1.2. Supuestos

Los siguientes supuestos se basan en el escenario ideal descrito por los datos del gobierno sobre el metro y en la opinión del líder de proyecto en ADO que pretendía mejorar la problemática de la estación del metro San Lázaro.

1. El tiempo de interarribo de cada tren es de 144 segundos.
2. Una hora pico es aquella donde llegan más de 200 personas en un periodo de 144 segundos.
3. La capacidad máxima para cada tren es, técnicamente, de 1,530 personas, pero en horas pico en la estación de San Lázaro pueden llegar a subir aproximadamente 1,800 personas.
4. Las personas que llegan al andén no siguen comportamientos extraños y esperan hasta poder subirse al metro.
5. Las variables de conteo del estudio siguen procesos de Poisson no-homogéneos y son independientes entre sí.
6. Las personas que suben al tren son la suma de los lugares que se desocupan más 150 lugares extras en horas pico y 300 en horas no pico.

2. Datos

Para nuestro problema, utilizamos una base de datos reales del número de personas que usaron las líneas 1 y B del metro de la Ciudad de México los días 27 y 28 de marzo del 2019, estación San Lázaro. La base de datos se encuentra en el anexo B, intitulado *Información de aforos peatonales metro San Lázaro*, del reporte de resultados «Estudio de impacto vial del CETRAM San Lázaro y la terminal de autobuses foráneos TAPO en la Ciudad de México». La información incluida es copiosa e incluye lo siguiente: el número de personas que ingresan por cada una de las 13 posibles entradas, así como cada una de las 7 salidas; también, se detalla las 9 diferentes rutas que los peatones pueden tomar para transbordar de una línea a otra. El conjunto de datos contempla las entradas

desde la calle, la TAPO y un puente peatonal entre las estaciones, cada 15 minutos. Por lo tanto, la unidad en la que están registrados los datos es por intervalos de 15 minutos. De la misma manera, contiene el número de personas que toman el túnel que conecta ambas líneas y el movimiento de esa gente tanto en dirección Observatorio como Pantitlán.

Por un lado, el detalle con el que se contabilizó el flujo de personas es notable, pues se tomó en cuenta no solo su paradero sino también la ruta que tomaron. En ese sentido, tuvimos que simplificar las variables, agregando todas las entradas y todas las salidas en variables totales; asimismo, sumamos la información de las rutas que la gente puede tomar en una sola variable que contabiliza la gente que transborda. Finalmente, descartamos la información tanto de la línea b como de la dirección Pantitlán, puesto que el problema acuña a la dirección Observatorio únicamente.

Por otro, la información se tomó solo de los días miércoles y jueves, lo cual sesga los datos, pues se ignoran los días lunes y viernes, que son los días más problemáticos de acuerdo con la experiencia del líder de este proyecto en ADO. En ese sentido, la muestra no es representativa. Aún más, las observaciones se realizaron solo de dos días; si se hubiesen realizado observaciones de más semanas, habríamos podido diagnosticar mejor fenómenos como estacionalidad, por ejemplo.

Por último, afuera de la estación en la línea 1 en las horas pico se limita la entrada de personas, de manera que además de la espera en los andenes, la gente tiene que esperar afuera de la estación; sin embargo, no se recabó ninguna información al respecto.

2.1. Variables utilizadas

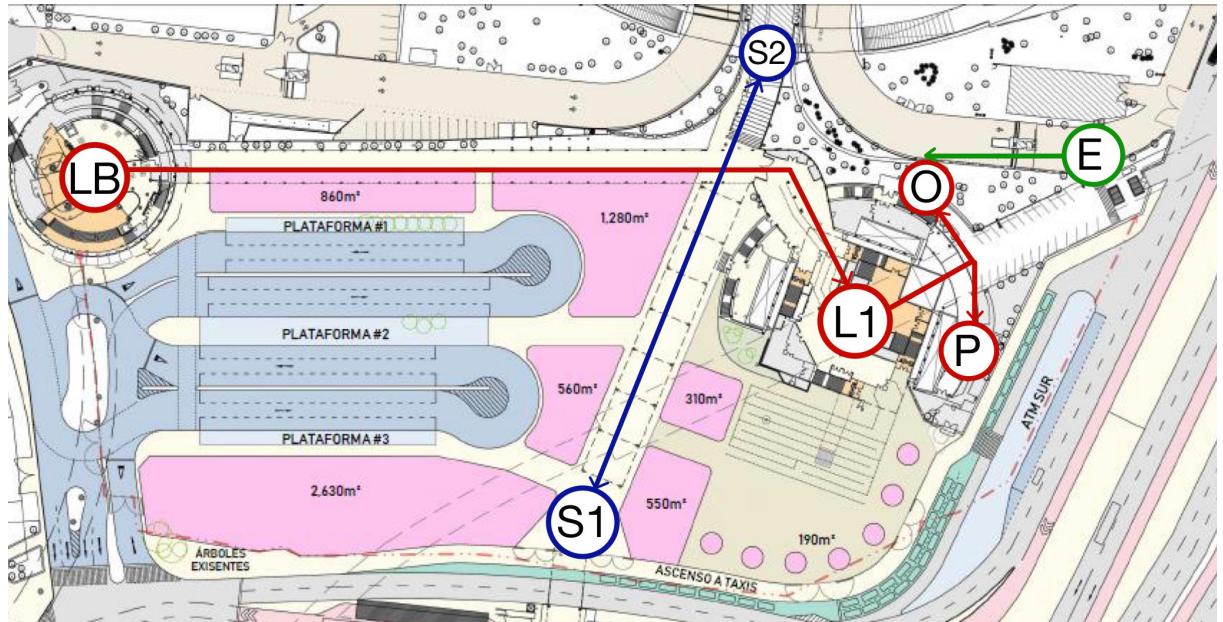


Figura 2.1. Descripción gráfica de las variables involucradas

- LB_t : Personas que salen de la Línea B y entran al túnel de transbordo, en el tiempo t . Estas personas pueden tomar una de las salidas, transbordar hacia la Línea 1 con dirección Pantitlán o transbordar hacia la Línea 1 con dirección Observatorio; por lo tanto, se tiene lo siguiente:

$$LB_t = O_t + P_t + S1_t + S2_t \quad (1)$$

donde

- O_t : Conteo de personas provenientes del túnel de transbordo que toman la Línea 1, con dirección a Observatorio, hasta el tiempo t .
- P_t : Conteo de personas provenientes del túnel de transbordo que toman la Línea 1, con dirección a Pantitlán, hasta el tiempo t .
- $S1_t$: Conteo de personas provenientes del túnel de transbordo que salen por la salida 1, hasta el tiempo t .
- $S2_t$: Conteo de personas provenientes del túnel de transbordo que salen por la salida 2, hasta el tiempo t .
- E_t : Conteo de personas que entran a la estación desde la calle y se dirigen a la Línea 1 en dirección Observatorio, hasta el tiempo t .
- X_t : Conteo de personas que esperan en el andén la llegada del tren con dirección a Observatorio hasta el tiempo t , esto es:

$$X_t = O_t + E_t$$

- L_t : Conteo de personas que se bajan del tren que llega a la estación, liberando espacio para que se suban más personas, hasta el tiempo t .

A continuación se presentan como se comportan los datos relevantes provistos en el estudio mencionado:

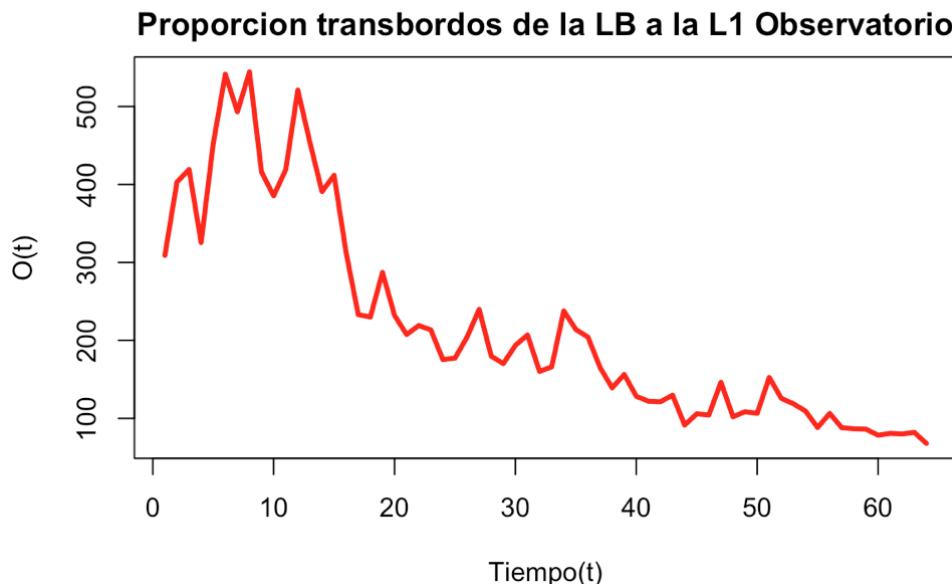


Figura 2.1.1. O_t : Conteo de personas provenientes del túnel de transbordo con dirección a Observatorio



Figura 2.1.2. E_t : Conteo de personas que entran desde la calle con rumbo a observatorio

Espacios liberados en los trenes

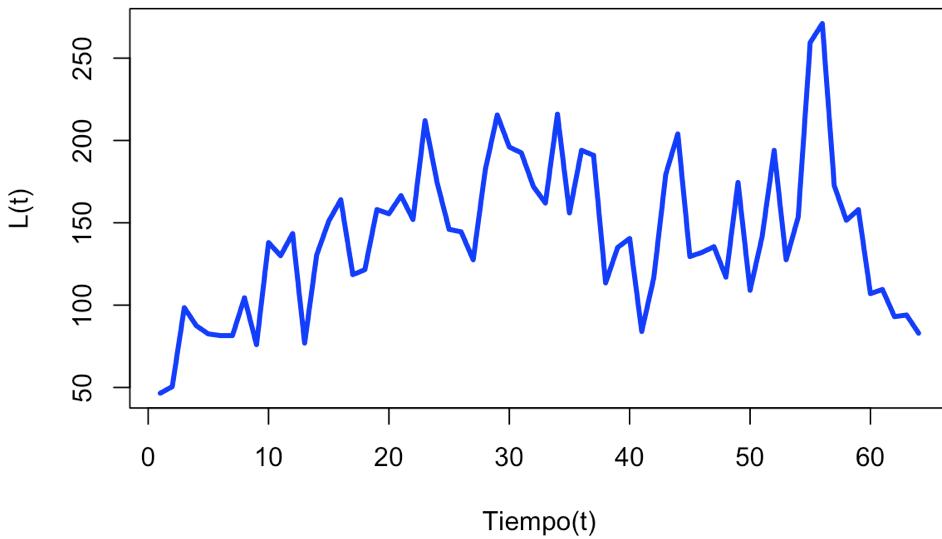


Figura 2.1.2. L_t : Conteo de personas que descienden del tren de la linea 1 (lugares liberados)

Es importante destacar como el mayor flujo de personas se encuentra en las primeras horas del día pues es cuando más personas transbordan y entran de la calle rumbo a Observatorio, por ser las horas en las que gran parte de la población se dirige a sus trabajos, además de ser el momento en el que menos personas salen.

3. Métodos

3.1. Ajuste del parámetro de intensidad

Al ser un problema que involucra el número de eventos (cantidad de personas) en un intervalo de tiempo, se utilizó un proceso de Poisson no homogéneo para cada una de las variables utilizadas. Como se mencionó previamente, el flujo de personas en el túnel de

transbordo se puede representar en la ecuación (1). Asumimos que cada una de las variables son independientes entre sí. A su vez, cada uno es un proceso de Poisson adelgazado, del proceso completo. Por lo tanto, a partir de la distribución de LB_t es posible conocer la distribución de cada uno de sus componentes como se describe a continuación.

Si suponemos que los arribos de O_t tienen probabilidad p_o , los demás sumandos de (1) tienen probabilidad $1 - p_o$ y si $LB_t \sim Poisson(\int_0^t \lambda_{LB}(s)ds)$, el resultado es el siguiente:

$$O_t \sim Poisson \left(p_o \cdot \int_0^t \lambda_{LB}(s)ds \right)$$

En este caso se utilizó como estimador $\hat{p}_o = \frac{N_O(T)}{N_{LB}(T)}$, donde $\{N_O(t)\}_{t \geq 0}$ y $\{N_{LB}(t)\}_{t \geq 0}$ denotan los procesos de conteo de las personas que van a Observatorio y que transbordan al tiempo t , respectivamente, y T denota el tiempo final de las observaciones. Es decir, la proporción de personas provenientes de la línea B que tomaron la línea 1 a Observatorio. Además, como son eventos independientes, si $E_t \sim Poisson(\int_0^t \lambda_E(s)ds)$, implica:

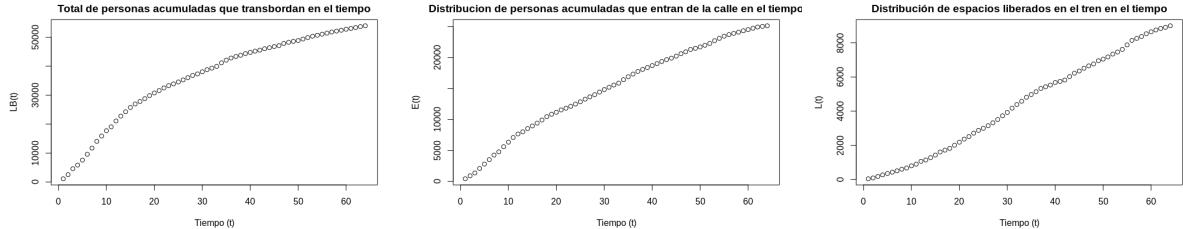
$$X_t = O_t + E_t \sim Poisson \left(p_o \cdot \int_0^t \lambda_{LB}(s)ds + \int_0^t \lambda_E(s)ds \right)$$

Para modelar el problema, fue necesario usar los datos existentes para construir los parámetros de intensidad de los procesos $\{LB_t\}$, $\{E_t\}$ y $\{L_t\}$. Para fines prácticos, las variables $S1_t$, $S2_t$ y P_t se vieron de manera indiferente y se juntaron como un solo caso: todas las personas que no toman el tren a Observatorio. De esta manera, no fue necesario simular cada una de ellas.

Ahora, pasamos a la construcción del parámetro de intensidad de los procesos. Primero, recordamos que para un proceso Poisson no homogéneo, $\{N_t\}$, se cumple que $\mathbb{E}(N(t)) = \int_0^t \lambda(s)ds$. Por lo anterior, se escogerá una función $\lambda(t)$ que minimice la suma de cuadrados siguiente:

$$\sum_{i=1}^n (\mathbb{E}(N(t_i)) - \int_0^{t_i} \lambda(s)ds)^2$$

con $\{t_i\}$ los distintos tiempos de observación provistos. Para llevar a cabo la minimización anterior, se preseleccionó una familia de funciones $\lambda(t)$, que ajuste correctamente a $\{N_t\}$. Después, se determinaron los parámetros para cada proceso por mínimos cuadrados no lineales. A continuación, se muestran las gráficas de las distribuciones promedio de las variables de conteo.



Por la forma de las anteriores distribuciones se propuso la familia $\{\lambda | \lambda(t) \doteq a \cdot t^b\}$. Para cada proceso, se escogerán los parámetros que satisfagan lo siguiente:

$$\min_{a,b} \left\{ \sum_{i=1}^n (\widehat{\mathbb{E}(N(t_i))}) - \int_0^{t_i} a \cdot s^b ds \right\}$$

El estimador de la esperanza que se utilizó fue el promedio de las observaciones al tiempo t , de cada día. Los resultados para cada caso se presentan a continuación.

| | a | b |
|--------|-------------|---------|
| LB_t | 2791.774024 | -0.3969 |
| E_t | 854.89965 | -0.2575 |
| L_t | 78.64256 | 0.193 |

De esta manera, se obtuvieron las siguientes funciones:

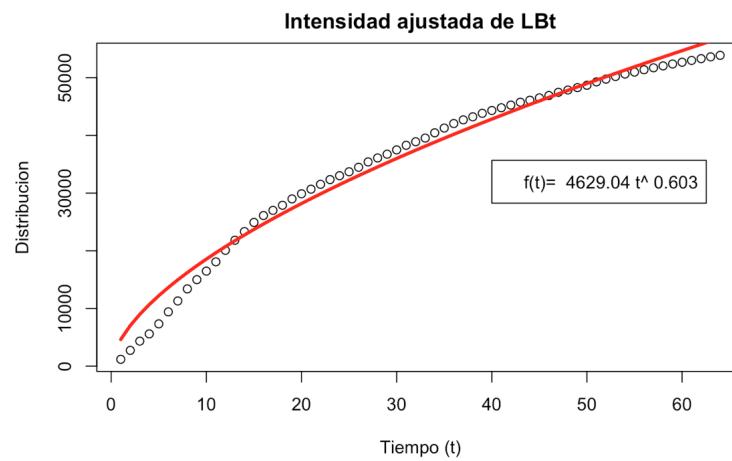


Figura 3.1. Parámetro de intensidad ajustado al promedio de personas acumuladas en el transbordo

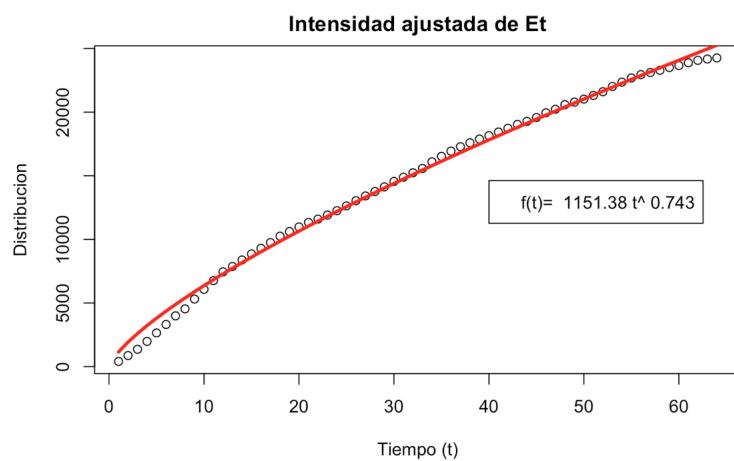


Figura 3.2. Parámetro de intensidad ajustado al promedio de personas acumuladas provenientes de la calle

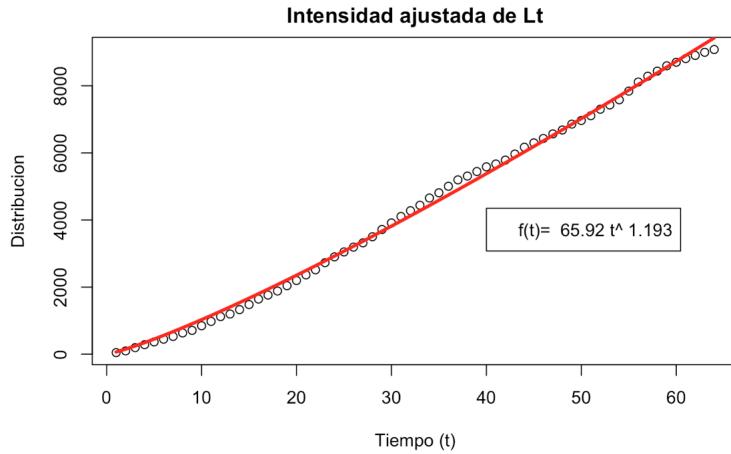


Figura 3.3. Parámetro de intensidad ajustado al promedio de espacios liberados en el tren

Los puntos negros representan las observaciones promedio obtenidas y la línea roja representa nuestro ajuste propuesto. Se puede observar que la función sugerida ajusta de manera razonable a los datos, por lo tanto nuestras simulaciones no difieren en mucho a las observaciones. Más adelante, ahondaremos en esto y compararemos lo obtenido con los datos reales.

3.2. Cálculo del número de personas esperando

Una vez calculados los parámetros, es posible simular el flujo de usuarios por cada día durante un año. Utilizamos los supuestos mencionados para estimar el número de usuarios que tienen la intención de abordar pero tienen que esperar en el andén al siguiente tren.

Sea R_t el número de personas que esperan hasta el tiempo t , entonces:

$$R_t = \max\{0, R_{t-1} + O_t + E_t - (L_t + \text{capacidad}_t)\}, \quad R_0 = 0 \quad (2)$$

Esto significa que el número de personas esperando hasta el tiempo t es la suma del número personas que esperaban en el periodo anterior, R_{t-1} , más el número de personas que transbordaron rumbo a Observatorio, O_t , más el número de personas que entraron de la calle rumbo a Observatorio, E_t . A esta suma se le resta el número de lugares libres en el tren, es decir, la suma del número de personas que se bajaron del tren, L_t , y la capacidad adicional que se mencionó en los supuestos. Si la resta es negativa, se asigna cero pues significa que hay más lugares libres que personas queriendo subir y por tanto nadie espera.

Con base en este resultado, se logró estimar el tiempo de espera promedio y se calculó el promedio anual. Finalmente, se modificaron algunas variables con el fin de ver como influyan en la mitigación de la espera. En la siguiente sección presentamos los resultados obtenidos en este último proceso.

4. Resultados

Partiendo de los supuestos y de los parámetros obtenidos anteriormente, simulamos la situación diaria del metro 365 veces para observar el comportamiento de la estación durante un dia promedio dentro de un año. A partir de las 365 simulaciones, se obtuvo

una media del número de usuarios esperando en el periodo t siguiendo la ecuación (2). A continuación se presenta la comparación entre las simulación obtenida como promedio de un año y los datos reales.

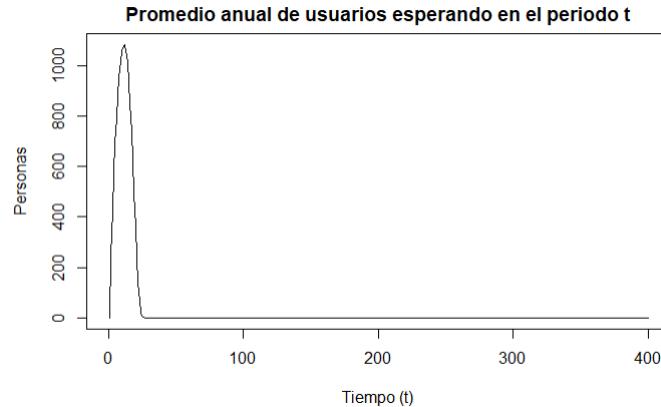


Figura 4.1. Simulación del número promedio anual de personas esperando

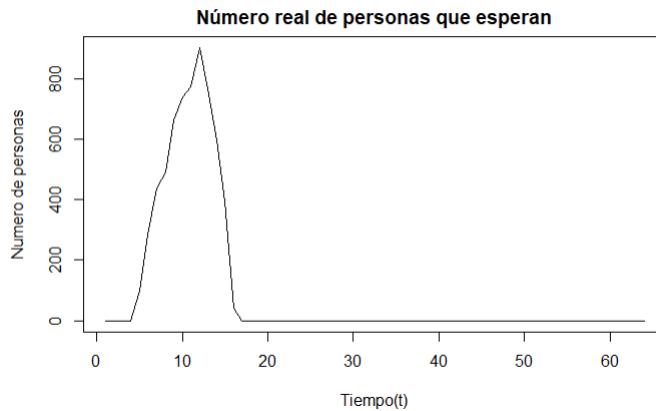


Figura 4.2. Número real de personas que esperan

En este caso, el tiempo tiene un soporte $t \in \{0, \dots, 400\}$, pues se está simulando el número de personas esperando cada tren, los cuales llegan cada 144 segundos; cada t representa el interarribo de un tren. De esta manera, el tren en el tiempo $t = 1$ es el primero que sale a las seis de la mañana y el tren en el tiempo $t = 400$ es el último tren que sale a las diez de la noche. En la figura 4.2 solo se muestran los primeros 60 trenes, pues para los siguientes el número de personas es cero.

Como se puede observar en la gráfica, los únicos trenes conflictivos son los primeros 20, es decir, los trenes de seis de la mañana a siete de la mañana. En esta hora se llegan a acumular hasta 1092 personas que esperan abordar el tren.

Dentro del conjunto de personas que esperaron, el promedio anual de tiempo de espera fue el siguiente:

$$\text{Tiempo de espera promedio} = 29.30357 \text{ minutos}$$

Lo anterior implica que los pasajeros tuvieron que esperar a que pasaran aproximadamente 12 trenes antes de poder abordar. Esto no solo provoca una mala experiencia de usuario sino que también, por la gran acumulación de personas esperando, la situación de estación se vuelve tan caótica que es un foco de inseguridad. Ante esta problemática se sugirieron y simularon tres propuestas para solucionar la espera. Se analizó en qué medida

mejoraban la problemática, ya sea por medio del tiempo de espera o por la reducción del número de personas esperando, así como las limitantes de cada una de ellas.

4.1. Reducir tiempo entre trenes

La primera propuesta consistió en tomar las medidas necesarias para acortar el tiempo de interarribo entre trenes. A pesar de requerir una inversión inicial, esta propuesta parecía realista pues, como se mencionó previamente, el tiempo entre trenes se ve directamente afectado por el número de personas que lo abordan. Entre más se excede la capacidad, el tren se vuelve más lento y se tarda más en llegar. Al reducir el tiempo entre trenes habría menos personas esperando abordar y por lo tanto, sería viable mantener esta velocidad.

A continuación, se muestra una gráfica donde se considera un tiempo entre trenes de 120 segundos, esto es, disminuyendo 24 segundos al tiempo original.

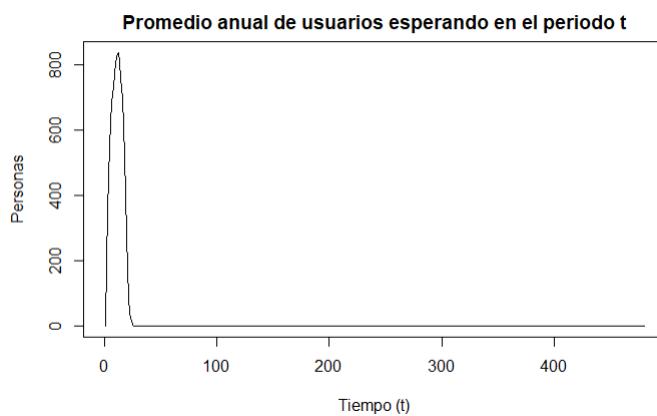


Figura 4.1.1. Reducción de tiempo entre trenes a 120 segundos

Se observa que hay una reducción en el número de personas esperando de 1092 personas a 837 personas. Además, ante el decremento en el tiempo de arribo entre trenes, el tiempo promedio de espera dado que se esperó se redujo de 29.3 minutos al siguiente:

$$\text{Tiempo de espera promedio} = 25.92562 \text{ minutos}$$

Efectivamente, hubo una disminución en el tiempo de espera pero los beneficios de esta medida (una reducción de tiempo de espera en 4 minutos) no son suficientes para contrarrestar los altos costos de su implementación. Una disminución de 24 segundos de tiempo entre trenes requiere inversión en investigación y tecnología que no es redituable. Por lo tanto, no es una medida en la que se deban concentrar las autoridades.

4.2. En la hora pico mandar un tren vacío cada tres trenes

La segunda propuesta consistió en enviar un tren vacío a la estación cada tres trenes. Se consideró que como se llegaban a acumular hasta 1092 personas esperando, se reduciría significativamente el tiempo de espera si todas ellas se pudieran subir al mismo tren. De esta manera, en lugar de esperar los 12 trenes que originalmente se esperan, estas esperarían no más de dos trenes.

Implementando dicha solución se obtuvieron los siguientes resultados:

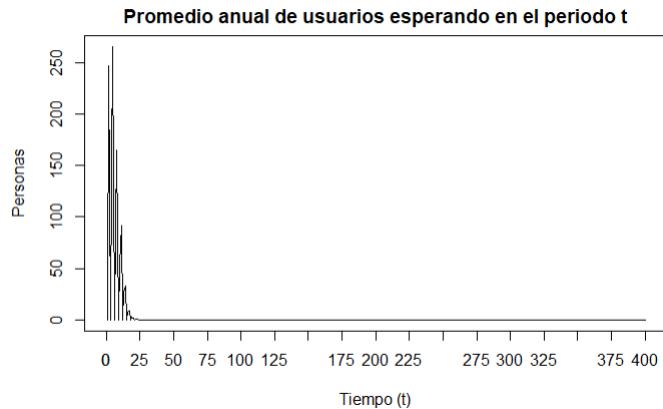


Figura 4.2.2. Tren vacío cada tres trenes

$$\text{Tiempo de espera promedio} = 3.232116 \text{ minutos}$$

El tiempo de espera se ve dramáticamente reducido en esta nueva simulación. Ahora en lugar de esperar a 12 trenes, se espera a 1.25. Además, el máximo número de usuarios esperando descendió de 1092 a casi 250. Con respecto a la gráfica de personas esperando a través del tiempo, podemos observar que existen disminuciones periódicas (cada 3 trenes) a cero de la cantidad de personas esperando, lo cual crea picos previamente inexistentes en la gráfica.

La solución resultó adecuada para disminuir el tiempo promedio de espera. Sin embargo, esta solución resulta impráctica pues la estación de San Lázaro está a siete estaciones de la cabecera de estación, justo a la mitad del recorrido. Más aún, otro problema es que estamos subutilizando el tren, puesto que el tren que llega vacío a San Lázaro no se llena completamente. Esto se hace claro en la gráfica 4.1, pues la máxima cantidad de usuarios esperando, previo a la implementación de alguna de las soluciones, nunca supera a las 1530 personas, la capacidad oficial del tren. Los picos en la gráfica son un indicio visual de la subutilización del tren.

Por esto último, una propuesta que dosifique el número de lugares, es decir que se reserve un vagón en todos los trenes al contrario de un tren cada 3 trenes, resulta superior pues no se subutiliza al tren.

4.3. Un vagón vacío en horas pico

La tercera propuesta fue que, con el objetivo de liberar un poco de capacidad en el tren, se mandara un vagón vacío desde la cabecera de la estación: las puertas del vagón no se abrirían en las estaciones previas a San Lázaro, reservando así 200 lugares para ayudar a descongestionar el andén de la estación, pero permitiendo que el resto del tren se utilizara normalmente en las estaciones anteriores para así disminuir el problema de subocupación de la propuesta anterior.

Cabe resaltar que esta solución es ampliable si persiste el problema, y se pueden enviar un mayor número de vagones vacíos, aunque una limitante es que esto disminuiría el espacio disponible para los usuarios de estaciones anteriores.

El resultado de la simulación es el siguiente:

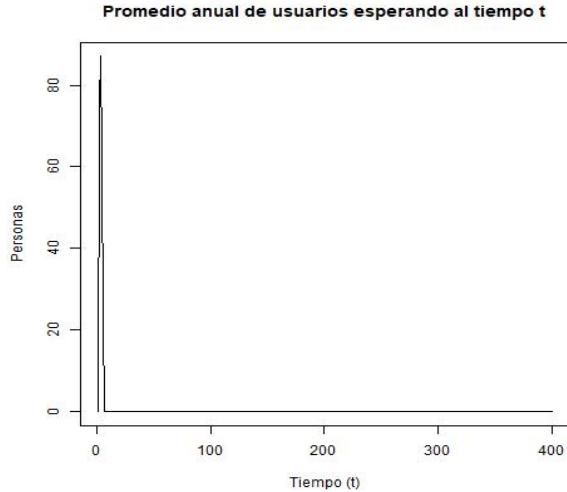


Figura 4.3.1. Enviar un vagón vacío

Tiempo de espera promedio = 390 segundos

El tiempo promedio de espera dado que se espera, con un vagón vacío, se redujo de 29 minutos a 390 segundos, es decir un poco más de 6 minutos, y los pasajeros esperan a lo más 3 trenes para abordar. A comparación de la propuesta de mandar un tren vacío cada tres trenes, el tiempo de espera de esta medida es mayor. Sin embargo, como se puede observar en la gráfica 4.3.1, ya no aparecen los picos de subutilización que se observaban en la propuesta anterior. Esto significa que, durante la hora pico, el tren va completamente lleno y no se subutiliza.

En cuanto al número máximo de personas que llegó a haber esperando al tren en las horas más conflictivas, descendió de más de 1092 personas a menos de 100 personas.

Por lo tanto, esta solución parece ser una solución resulta ser las más adecuada pues, además de disminuir el tiempo de espera en más de un 77% y reducir el número de personas esperando, logra que el tren se ocupe eficientemente al no haber lugares vacíos. Es probable que esta medida ocasione que en las estaciones anteriores, se incremente el número de personas esperando. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que no son estaciones tan transitadas ni con una acumulación de personas tan masiva como la de San Lázaro por lo que esta propuesta ayuda a balancear el número de pasajeros entre estaciones.

5. Conclusiones

La estación de San Lázaro es muy concurrida dado que conecta dos líneas de metro, así como la central de autobuses «La Tapo» y una estación de Metrobús. Ante esto, se han presentado graves problemas de movilidad, especialmente en las horas pico, en las que la capacidad de los trenes, que llegan ya llenos, es insuficiente para la demanda de los usuarios. El problema que se modeló fue el del andén de la Línea 1, con dirección hacia Observatorio, en el que los tiempos de espera de los ciudadanos pueden ser considerablemente altos.

El análisis del problema y sus posibles soluciones se hizo por medio de la simulación, basándose en datos reales de dos días, de los diferentes flujos de personas: tanto los que transbordan de la Línea B como los que entran a la estación desde la calle, y las personas que descienden del metro en dicha estación. Para esto, se utilizó un proceso de Poisson no homogéneo adelgazado, y el parámetro de intensidad de los procesos se ajustó de la mejor forma posible de acuerdo con el criterio de mínimo error cuadrático. A continuación, se procedió a la simulación de los procesos, con la que obtuvimos, por período, el número de personas que no podían subir al tren y que tenían que esperar, así como sus tiempos de espera antes de poder abordar.

Las soluciones propuestas jugaron con únicas variables que se pueden afectar: el tiempo de interarribo de cada tren, y la capacidad con que llegan éstos. El número de personas que llegan al andén es muy difícilmente modificable, ya que, difficilmente los ciudadanos que toman el metro tienen la posibilidad de modificar la hora a la que deben desplazarse o la ruta que toman.

Una primera solución, reducir el tiempo de interarribo entre trenes de 144 segundos a 120 segundos, arrojó que el tiempo de espera promedio solo diminuía en 4 minutos, lo cual no es suficientemente funcional ni reditúa los esfuerzos necesarios para implementar esta propuesta.

La segunda solución, que consistió en enviar un tren vacío cada tres trenes en horas pico, redujo mucho el tiempo de espera de los usuarios (a aproximadamente tres minutos), pero hizo surgir el problema de la subocupación de los trenes que se enviaban vacíos, que no se llenaban a su máxima capacidad.

Una tercera solución, continuación de la idea de la precedente de liberar más espacio en el metro, fue reservar únicamente cierto número de lugares para la estación, mediante el envío de un vagón vacío. Los resultados fueron los esperados: el tiempo de espera promedio se redujo, aunque no tanto como cuando el tren llegaba totalmente vacío, sin llegar al punto en que el tren fuera subutilizado.

En consecuencia, contemplamos varias posibilidades que ampliarían nuestro estudio; estas mejoras van de la mano con las principales limitaciones del proyecto. El obstáculo más importante fue el tamaño de la base de datos, puesto que solo contiene la información de dos días –jueves y miércoles–. Entonces, tuvimos que asumir que cualquier día de la semana, así como todos los meses del año, son correctamente representados por esta muestra de dos días, lo cual no es razonable. Al mismo tiempo, para algunos cálculos tuvimos que usar promedios de dos datos –uno por cada día– para estimar la esperanza, como al estimar la función de intensidad del proceso de Poisson no homogéneo; lo anterior lleva a un sobreajuste y hace imposible obtener estimaciones robustas ante cambios en las muestras observadas. La primer vía de ampliación sería recolectar datos de toda la semana, y de varias semanas; empíricamente, se sabe que los días más problemáticos son en realidad lunes y viernes, por lo que este sería el primer paso en obtener un modelo verdaderamente utilizable.

Entonces, se podría ampliar nuestro estudio aumentando la precisión del estudio midiendo, como se mencionó anteriormente, datos de toda una semana e incluso de diferentes estaciones del año. En efecto, se pueden tomar medidas diferentes que solucionen el problema de movilidad para cada caso. Por ejemplo, el presente estudio se hizo tomando en cuenta mediciones de los días jueves y miércoles, pero los días lunes y viernes pueden llegar a ser mucho más conflictivos, y probablemente requieran otro tipo de medidas (como

mandar dos vagones vacíos en vez de uno). Del mismo modo, no tiene mucho caso enviar vagones vacíos si la demanda de los usuarios no es tan alta, por ejemplo un sábado o domingo. Se puede tomar en cuenta también las diferencias de los flujos para diferentes periodos o estaciones del año para optimizar la toma de decisiones.

Una segunda manera de aumentar la precisión del estudio sería registrando los tiempos de llegada de las personas, en vez de solamente el número de personas en un período de tiempo. Con ello se podría crear un modelo más exacto, pues la dinámica en las primeras horas del día cambia rápidamente y períodos de 15 minutos no alcanzan a detectar toda esta dinámica. Aunque el modelo mejoraría con ello, no creemos que la mejora sería substancial, por lo que podría evitarse si la implementación resulta muy complicada.

Finalmente, otra alternativa de mejora es considerar los costos en el modelo. En ese sentido, se tendría que evaluar el costo social inicial y luego contrastarlo con el presupuesto necesario para cada posible solución.

6. Fuentes

CVT Consultores en Vialidad y Transportes S.C. (2019), *Anexo B: Información de aforos peatonales metro San Lázaro*, del reporte «Estudio del impacto vial de CETRAM San Lázaro y la terminal de autobuses foráneos TAPO en la Ciudad de México»

Cebrián, Ana C., et al. “NH_Poisson: An R Package for Fitting and Validating Non-homogeneous Poisson Processes.” *Journal of Statistical Software*, vol. 64, no. 6, 2015, doi:10.18637/jss.v064.i06.

Czeslaw Drazek, Ludwik. “Intensity Estimation for Poisson Processes.” The University of Leeds, School of Mathematics, 2013.

7. Anexos

A continuación, presentamos la base de datos original.

| PERIODO | Entrada E1 | | Salida S1 | | Salida S2 | | Entrada E2 (a Pantitlán) | | Entrada E3 (a Observatorio) | |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------------------|------------|-----------------------------|------------|
| | 27-mar.-19 | 28-mar.-19 | 27-mar.-19 | 28-mar.-19 | 27-mar.-19 | 28-mar.-19 | 27-mar.-19 | 28-mar.-19 | 27-mar.-19 | 28-mar.-19 |
| 06:00 - 07:00 | 613 | 693 | 203 | 104 | 268 | 298 | 264 | 262 | 2,066 | 1,897 |
| 07:00 - 08:00 | 868 | 971 | 108 | 182 | 333 | 367 | 356 | 333 | 2,686 | 2,428 |
| 08:00 - 09:00 | 864 | 1,001 | 153 | 169 | 462 | 513 | 281 | 295 | 2,891 | 2,929 |
| 09:00 - 10:00 | 896 | 979 | 159 | 175 | 549 | 496 | 175 | 207 | 1,747 | 1,943 |
| 10:00 - 11:00 | 1,022 | 964 | 233 | 182 | 572 | 535 | 156 | 182 | 1,765 | 1,596 |
| 11:00 - 12:00 | 1,000 | 1,026 | 158 | 157 | 695 | 715 | 178 | 214 | 1,314 | 1,249 |
| 12:00 - 13:00 | 890 | 1,005 | 173 | 247 | 630 | 570 | 164 | 246 | 1,532 | 1,471 |
| 13:00 - 14:00 | 1,015 | 1,108 | 159 | 297 | 881 | 671 | 241 | 348 | 1,548 | 1,403 |
| 14:00 - 15:00 | 1,081 | 1,106 | 300 | 314 | 751 | 705 | 304 | 379 | 1,778 | 1,623 |
| 15:00 - 16:00 | 1,067 | 1,077 | 463 | 480 | 537 | 623 | 328 | 327 | 1,361 | 1,073 |
| 16:00 - 17:00 | 1,064 | 1,045 | 575 | 486 | 545 | 623 | 250 | 353 | 1,207 | 1,037 |
| 17:00 - 18:00 | 1,113 | 1,104 | 492 | 538 | 540 | 488 | 332 | 361 | 1,409 | 1,208 |
| 18:00 - 19:00 | 1,158 | 1,166 | 470 | 600 | 578 | 660 | 532 | 598 | 968 | 1,083 |
| 19:00 - 20:00 | 1,136 | 1,134 | 363 | 261 | 806 | 817 | 400 | 598 | 1,424 | 1,252 |
| 20:00 - 21:00 | 1,120 | 1,111 | 298 | 254 | 499 | 679 | 289 | 398 | 808 | 627 |
| 21:00 - 22:00 | 1,095 | 1,081 | 362 | 255 | 352 | 407 | 286 | 294 | 618 | 576 |
| | 16,002 | 16,571 | 4,669 | 4,701 | 8,998 | 9,167 | 4,536 | 5,395 | 25,122 | 23,395 |

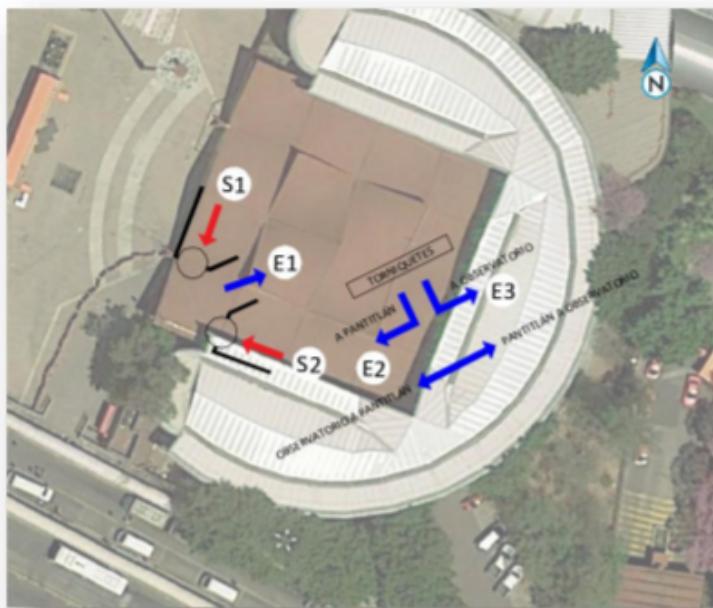


Figura 7.1. Diagrama y datos de entradas y salidas a la estación del Metro San Lázaro

Volumen peatonal por hora. Metro San Lázaro.

| PERIODO | E9, Transbordo LB-L1 | | E10, Transbordo LB-L1 | | E11, Transbordo LB-L1 | | E12, Transbordo LB-L1 | | E13, Transbordo LB-L1 | |
|---------------|----------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|
| | 27-mar.-19 | 28-mar.-19 | 27-mar.-19 | 28-mar.-19 | 27-mar.-19 | 28-mar.-19 | 27-mar.-19 | 28-mar.-19 | 27-mar.-19 | 28-mar.-19 |
| 06:00 - 07:00 | 441 | 565 | 201 | 174 | 2,015 | 1,977 | 133 | 110 | 1,945 | 1,545 |
| 07:00 - 08:00 | 1,232 | 1,256 | 279 | 258 | 2,159 | 2,494 | 133 | 143 | 2,733 | 2,782 |
| 08:00 - 09:00 | 999 | 1,168 | 342 | 345 | 1,985 | 2,157 | 148 | 153 | 2,814 | 2,641 |
| 09:00 - 10:00 | 596 | 522 | 365 | 342 | 2,261 | 1,765 | 120 | 103 | 2,234 | 1,995 |
| 10:00 - 11:00 | 352 | 243 | 284 | 310 | 1,189 | 1,007 | 170 | 145 | 1,122 | 1,406 |
| 11:00 - 12:00 | 91 | 67 | 358 | 325 | 523 | 699 | 189 | 236 | 1,353 | 1,288 |
| 12:00 - 13:00 | 63 | 61 | 508 | 542 | 610 | 821 | 306 | 185 | 1,330 | 1,130 |
| 13:00 - 14:00 | 78 | 84 | 633 | 588 | 769 | 796 | 243 | 273 | 1,002 | 930 |
| 14:00 - 15:00 | 67 | 58 | 731 | 681 | 989 | 789 | 502 | 358 | 1,280 | 1,126 |
| 15:00 - 16:00 | 82 | 59 | 654 | 599 | 501 | 624 | 440 | 485 | 824 | 758 |
| 16:00 - 17:00 | 39 | 44 | 524 | 539 | 585 | 477 | 514 | 532 | 629 | 584 |
| 17:00 - 18:00 | 31 | 29 | 783 | 894 | 489 | 377 | 701 | 675 | 564 | 499 |
| 18:00 - 19:00 | 24 | 41 | 1,182 | 1,303 | 346 | 445 | 1,050 | 976 | 535 | 621 |
| 19:00 - 20:00 | 24 | 66 | 1,346 | 1,341 | 386 | 391 | 993 | 984 | 460 | 603 |
| 20:00 - 21:00 | 11 | 41 | 936 | 937 | 246 | 299 | 768 | 819 | 316 | 357 |
| 21:00 - 22:00 | 7 | 2 | 658 | 650 | 194 | 259 | 876 | 802 | 261 | 336 |
| | 4,137 | 4,306 | 9,784 | 9,828 | 15,247 | 15,377 | 7,286 | 6,979 | 19,402 | 18,601 |

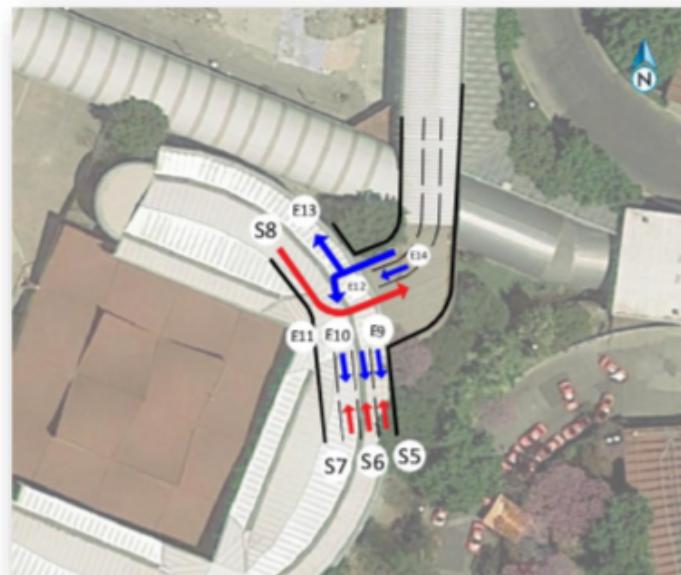


Figura 7.2. Diagrama y datos de transbordos en la estación del Metro San Lázaro