



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

ANÁLISIS DE DISRUPCIONES DEL SERVICIO DE METRO Y SU IMPACTO EN LA RED DE TRANSPORTE A TRAVÉS DE UNA MODELACIÓN HÍBRIDA ABM-DES: UN CASO DE ESTUDIO DEL METRO VALPARAÍSO

Memoria de Título presentada por

Joaquín Andrés Ríos Arancibia

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Felipe Andres Araya Araya

Enero de 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Análisis de interrupciones del servicio de metro y su impacto en la red de transporte a través de una modelación híbrida ABM-DES: Un caso de estudio del Metro Valparaíso

Nombre del candidato(a): Joaquín Andrés Ríos Arancibia

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: Casa Central

Departamento: Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Felipe Araya, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 22/01/2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 21 de enero del 2026

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA MEMORIA:

**ANÁLISIS DE DISRUPCIONES DEL SERVICIO DE METRO Y SU
IMPACTO EN LA RED DE TRANSPORTE A TRAVÉS DE UNA
MODELACIÓN HÍBRIDA ABM-DES: UN CASO DE ESTUDIO DEL
METRO VALPARAÍSO**

AUTOR:

JOAQUÍN ANDRÉS RÍOS ARANCIBIA

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre

Firma

Prof. Guía

Felipe Araya

.....

Miembro 1 Comisión

Marcelo Bravo

.....

Valparaíso, Chile, Enero de 2026

ANÁLISIS DE DISRUPCIONES DEL SERVICIO DE METRO Y SU IMPACTO EN LA RED DE TRANSPORTE A TRAVÉS DE UNA MODELACIÓN HÍBRIDA ABM-DES: UN CASO DE ESTUDIO DEL METRO VALPARAÍSO

Joaquín Andrés Ríos Arancibia¹, Felipe Andres Araya Araya²

¹ Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile

Resumen

En los últimos años, las sociedades han aumentado su exigencia sobre el correcto funcionamiento de los sistemas de infraestructura. Es por ello que se hace imperante contar con métodos para poder gestionar y manejar fenómenos que interrumpan el normal funcionamiento de estos servicios. Esta investigación busca estudiar este tipo de situaciones asociadas principalmente a sistemas de metro, y construir un modelo que sea capaz de simular diferentes escenarios de interrupción del servicio. Los resultados de este estudio son la cuantificación de los efectos que generan diferentes tipos de interrupciones en el sistema del Tren Limache – Puerto, a través de la obtención del número total de pasajeros afectados y del número de usuarios que optan por cada modo de transporte adyacente al sistema mencionado. Junto con ello, se establecen recomendaciones a EFE Valparaíso, en base a los costos logísticos y económicos que generan estos fenómenos de interrupción. La contribución del estudio es proponer un modelo en el cual se permite simular la interacción entre los distintos componentes del sistema de metro, en el cual se utilizaron características y parámetros de primera fuente al considerar la opinión de los usuarios del servicio. Esto permite lograr un mejor entendimiento del problema para las agencias encargadas de estos servicios, con lo cual se pueden diseñar planes de gestión más óptimos y eficientes que tengan como consecuencia final una mejora en la calidad de vida de las personas.

Palabras claves: Infraestructura de transporte, modelación, interrupciones, ABM, DES.

1 Introducción

Los sistemas de infraestructura son los pilares básicos que conforman el adecuado funcionamiento de una sociedad, dentro de los cuales se encuentran los sistemas de electricidad, los sistemas de transporte, los sistemas de telecomunicaciones, los sistemas de agua potable, entre otros. Es por esto, que la falla en uno de ellos implica consecuencias negativas, no solo a nivel individual (personas) sino también a nivel colectivo (sociedad), y una disrupción grave o de más de un sistema en simultáneo podría incluso detener un país por completo. En base a esto, es posible notar que la forma y la rapidez con la que se logran reponer estos servicios y la forma de gestionarlos en medio de la interrupción, es decir, la resiliencia de estos, cumple un rol fundamental para mejorar la calidad de vida de las personas y de la sociedad que forman en su conjunto (Alanís, 2016).

Los sistemas de transporte son uno de los componentes críticos de las sociedades en la actualidad, sobre todo considerando este período caracterizado por la globalización que ha sufrido el mundo en los últimos años, estableciendo exigencias para tener modos de transporte rápidos, seguros y eficientes. Más aún, este efecto puede no solo apreciarse a nivel global (mundial) sino también a nivel local (país), donde la expansión y el desarrollo de las ciudades ha inducido nuevas oportunidades laborales, económicas, académicas y otras, alentando así a que los gobiernos se preocupen de conectar de diversas y convenientes maneras los distintos lugares de interés dentro de su país. Queda de manifiesto la importancia que tienen estos sistemas en el funcionamiento de una nación, puesto que una interrupción en uno o varios de ellos puede generar que la población no pueda desplazarse hacia los lugares de interés, imposibilitando, por ejemplo, llegar a los lugares de trabajo y de estudio, un regreso adecuado de las personas a sus hogares, entre otras consecuencias.

Los sistemas de metros se han convertido en una opción atractiva y una solución eficaz al problema de transportar individuos a cualquier escala en el mundo, sea desde un país a otro, desde una región de un país a otra del mismo, dentro de las ciudades componen los países, etc. Es por ello que debe recalcarse la importancia que estos tienen para el desarrollo de la vida de las personas y poner especial interés en lograr un adecuado manejo y gestión del servicio, para poder entregar la mejor calidad del mismo y a su vez generar valor público (Galván, 2023).

Es sabido que los sistemas de metro, y al igual que todos los demás sistemas de infraestructura, están expuestos a diversos tipos de disrupciones que pueden alterar el normal funcionamiento de sus servicios, estas pueden ser provocadas por distintos factores como terremotos, tsunamis, caída de aguas lluvias, caída de aguas nieve, deslizamiento o desmoronamiento de sectores de tierra, fallas de tipo técnicas, humanas, de electricidad, entre muchas otras. Sin embargo, la gran mayoría de estas no pueden ser evitadas en su completitud, luego se hace imperante contar con mecanismos de gestión de este tipo de situaciones para lograr entregar una mejor calidad del servicio hacia los usuarios, y disminuir de la mayor manera posible las consecuencias negativas que incurren sobre ellos, relacionadas principalmente a la pérdida de tiempo, la cual trae consigo pérdidas de productividad en el trabajo, en los estudios en caso de ser escolares o universitarios, etc.

En el caso particular de Chile, existe el sistema más representativo de este tipo de transporte llamado Metro de Santiago, el cual puede llegar a transportar a más de 2.3 millones de personas diariamente (Grube et al., 2011), es decir, más del 30% de la población total de la Región Metropolitana si tomamos en cuenta los datos del último Censo 2024. En el caso particular de esta investigación, en la Región de Valparaíso se encuentra el Tren Limache – Puerto, el cual, según estadísticas proporcionadas por EFE Valparaíso en su última Memoria Anual (2024), durante los últimos tres años, se transportaron más de 21 millones de pasajeros en promedio por año, dando cuenta así de la relevancia que tienen estos servicios en nuestro país.

La Región de Valparaíso no ha estado exenta a las distintas disrupciones que han podido afectar al metro durante los últimos años. En el año 2015 hubo un temporal que azotó a gran parte de país y específicamente a esta región trajo consecuencias graves, haciendo que el servicio de metro no funcionara por alrededor de una semana. En el año 2025 hubo un corte de luz a nivel nacional, lo que provocó que los sistemas de electricidad no funcionaran adecuadamente por lo que el servicio de metro tuvo que ser suspendido durante toda la duración de este evento. Si bien estos son casos de mayor

gravedad y duración, también existen disrupciones que no necesariamente apuntan a una caída de toda la red o que esta sea durante todo un día, como lo que sucede cuando existen manifestaciones cercanas a alguna estación, incidencias de parte del suministro de energía, procedimientos policiales, caída de vehículos a las vías del tren, entre otras.

Estas disrupciones, como ya se ha dicho con anterioridad, generan impactos en los usuarios los cuales queremos que, o bien no ocurran, o sean lo más mínimo posibles. Uno de los factores que más interesan en este tipo de situaciones, es la capacidad de parte de los sistemas de transporte de cubrir esta sobre demanda que se está dando en ellos dada la no funcionalidad del metro, esto quiere decir, que sean capaces de transportar a todos los pasajeros que originalmente viajaban en metro para que efectivamente lleguen a sus destinos si es que aquello es lo que necesitan (Mo et al., 2022). Por otro lado, también es interesante cuantificar estos efectos, por ejemplo, en el estudio de M'Cleod et al. (2017) se estudia cómo valorizar el tiempo de retraso que sufren los individuos debido a la interrupción del servicio de metro en un caso particular de su zona de estudio.

Por todo lo mencionado anteriormente, en este estudio se analizará el sistema del Tren Limache - Puerto y los impactos que generan diferentes tipos de disrupciones en los usuarios y en los demás sistemas de transporten que componen la zona. Para ello se pretende, en primer lugar, describir de manera correcta la red de metro existente en el lugar y el flujo normal de los pasajeros, es decir, sin la presencia de una interrupción, luego se busca simular el comportamiento de los usuarios a través de distintos escenarios de disrupciones que se presenten en la línea del metro, para poder cuantificar cómo se ven afectados cada uno de los otros modos de transporte debido a las decisiones que toman los individuos en cada una de las situaciones, y así, finalmente, proponer recomendaciones acerca del manejo y gestión de disrupciones de este caso de estudio.

2 Revisión de literatura

2.1 Disrupciones en servicios de metro

Numerosos estudios han tratado acerca de las disrupciones en servicios de metro a lo largo de todo el mundo. Una de las formas en las que se ha concentrado aquello, es analizar la ocurrencia de las mismas, como ocurre con el estudio de Liu et al. (2021) y el de (Galván, 2023), en donde a través de data histórica de distintos tipos de disrupciones, se trata de estimar cuál es la probabilidad de ocurrencia de cada una de las fallas categorizadas, para dar así con una estimación de los futuros incidentes y sobre cuáles debiese ponerse más atención que a otros.

Por otro lado, también se ha intentado establecer las posibles causas o si existe algún tipo de factores que haga ser más propenso a cierto tipo de disrupciones por parte de las redes de metro. El estudio de Wang et al. (2020) investiga las características topológicas de una red de metro en la que se buscan establecer relaciones entre ciertos parámetros propuestos y el impacto que tienen las disrupciones según los mismos, mientras que el estudio de Louie et al. (2017), por ejemplo, se enfoca en predecir los tiempos de retraso por incidente basado en si estos provienen de factores casuales o no casuales, a través de un modelo de amenaza.

Ahora bien, no es posible entender los efectos e impactos que genera una interrupción de servicio de metro sin considerar los modos de transporte y la infraestructura de los mismos que lo rodean. Es por ello que estudios como el de Zhang et al. (2023) tienen por objetivo establecer si existe una relación entre distintos sistemas de transporte, en este caso, entre las disrupciones ocurridas en un sistema público de tránsito dominado por las redes de metro y de buses, obteniendo cuál es la interdependencia que existe entre ellos. Sin embargo, existen escasos estudios que abarquen los sistemas de transporte de una manera integral, esto debido a su complejidad en el alcance, resultando difícil establecer relaciones entre más de dos sistemas, aunque en la realidad esto es lo que sucede al interactuar todo tipo de vehículos en una situación como la mencionada.

Una de las características principales de la gran mayoría los estudios mencionados y los que rondan la temática del estudio, es que estos han sido realizados en países con una infraestructura y población por lo general mayor que la existente en Chile, tal como en China en las ciudades de Beijing y Nijang, en Estados Unidos en las ciudades de Chicago y New York, en España en ciudades como Madrid, en Canadá el caso de Toronto, etc. Ahora bien, el estudio de Grube et al. (2011) efectivamente es realizado en Chile, donde se trata de modelar el sistema de red del Metro Santiago y verificar si es aplicable el software utilizado al comportamiento de este metro. Sin embargo, todos los estudios mencionados anteriormente tratan de redes de metro multilíneas, lo cual es un caso muy distinto a cuando solo existe una línea de metro, puesto que en este último caso existe una mucho mayor criticidad de parte de la red, pues al fallar una parte de la línea afecta a todo el sistema de transporte, existiendo menores posibilidades y menores rutas alternativas disponibles que utilizar para sortear la interrupción.

Los principales resultados de los estudios mencionados han sido, por un lado, el conocimiento acerca de las disrupciones que ya han ocurrido, y el cómo ellas proyectarlas principalmente a través de un número de ocurrencia, en el cual también pueden llegar a establecerse relaciones entre las características de las redes y los efectos en las duraciones o impactos de las disrupciones, entendiendo la fundamental labor que tienen los sistemas de metro y los impactos severos que puede llegar a casuar una anomalía en su normal funcionamiento. Por otro lado, se ha investigado acerca de sistemas de infraestructura, y en su defecto de sistemas de transporte, en lugares donde existe una amplia y desarrollada red donde existen niveles de redundancia altos, es decir, no existe una sola vía para ir desde un origen a otro y las relaciones entre los sistemas de transporte por lo general se reduce a un análisis de pares, ignorando por momentos el efecto de todas las diferentes opciones de modos de transporte que se presentan.

2.2 Aspectos de modelación

Existen distintas formas de representar y modelar sistemas de infraestructura como lo son los enfoques empíricos, la simulación basada en agentes (ABM), sistemas dinámicos, modelos basados en la teoría económica, enfoque basado en redes, entre otros (Ouyang, 2014). Los primeros se basan en data

histórica acerca del problema a modelar para probar hipótesis en base a experiencia empírica. Los segundos (ABM) se basan en el comportamiento de los individuos de un sistema y su comportamiento cambiante y evolutivo que pueden tener a lo largo de la simulación. Los sistemas dinámicos (DS) se utilizan para modelar sistemas complejos basado en acumulaciones de cantidades y flujos donde existe una retroalimentación por parte de los componentes del sistema. Los modelos basados en teoría económica se fundamentan en hacer una analogía del tipo de relación que existe en el mercado, donde agentes construyen bienes que otros consumen. Por último, los enfoques basados en redes intentan representar los sistemas a través de una estructura de arcos y nodos en donde las relaciones entre quienes integran el sistema se presentan a través de los enlaces entre los elementos (Hasan & Foliente, 2015).

Abocado al trabajo relativo a esta investigación, los estudios muestran diferentes alternativas de modelación para un problema relacionado con flujos de pasajeros, elecciones por parte de individuos, el uso de data y estadística pertinente para generar información concerniente a la ocurrencia de los eventos de interés. En primer lugar, la modelación basada en eventos discretos (DES) muestra una basta evidencia de su uso para problemas donde existen flujos de pasajeros entre un punto y otro, como lo es en el caso de los sistemas de metro, tal como ocurre en el estudio de Grube et al. (2011), basándose en la premisa de que lo que ocurre con los pasajeros entre las estaciones no es de gran interés puesto que no añade información valiosa. Por otro lado, la modelación basada en agentes ha sido utilizada principalmente para representar el comportamiento de los usuarios frente a una situación problemática; Hajhashemi et al. (2019) respecto de qué acciones toman las personas luego de sufrir un Huracán para ver los efectos que genera un fenómeno de este tipo, Zhao et al. (2022) para conocer cuáles son los impactos del nivel de inundación de una red de metro, enfocándose en los cambios de demanda que este sufría, etc.

Ahora bien, el estudio de Araya (2022), muestra que existen también una gran cantidad de investigaciones que utilizan simulaciones híbridas, es decir, más de un tipo de simulación a la vez, esto para lograr eliminar ciertas limitaciones que contienen intrínsecamente cada uno de los métodos. Un ejemplo de ello es el estudio de Abel & Faust (2020), en donde ocupan los métodos ABM y DES combinados para encontrar los factores que inciden en las personas para tomar una determinación respecto a la elección de un tipo de alimentos u otros.

Ahora con respecto a los programas o softwares en los que se puedan trabajar este tipo de simulaciones, encontramos distintas alternativas presentes en las investigaciones realizadas hasta el momento. Ibáñez et al. (2010) utiliza el programa Matlab con el fin de poder minimizar o maximizar funciones como los costos sujetos a restricciones, en Su et al. (2023) utilizan Java para correr su simulación acerca de la distribución de flujos de pasajeros debido a una disrupción, en Grube et al. (2011) ocupan un programa llamado SimDimMetro para simular el comportamiento de la red de metro en estudio, en el estudio de Abel & Faust (2022) se utiliza el software AnyLogic para permitir una simulación híbrida y entender el comportamiento de las personas frente a una disrupción y a la vez representar el flujo del transporte, entre otros.

Más específicamente respecto de la modelación de disrupciones de servicios de metro, existen diversos trabajos que recopilan distintas características acerca de este tipo de situaciones, entre las cuales se encuentran las maneras en que los pasajeros deciden cuál medio de transporte utilizar para poder completar el trayecto que planeaban inicialmente, por otro lado los tipos de disrupciones asociadas principalmente a la duración de esta y los escenarios de interés que se generan a través de cada una ellas, también lo referido a la población de usuarios que se pretende modelar, entre otros aspectos, los cuales son clave y definen los enfoques de las investigaciones.

Respecto de la forma en que los individuos deciden cuál medio de transporte utilizar para poder sortear la disrupción, estudios como el de Mo et al. (2022) se aproximan a un modelo que es capaz de inferir cuál es la decisión de las personas basándose principalmente en los factores demográficos que presentan y en la data proveniente de los sistemas de cobro de tarifas, es decir, del registro que obtienen los lectores de tarjeta inteligentes en las estaciones de metro. Por otro lado, existen pocos estudios en el cual se deje que la elección por parte de los pasajeros sea más bien probabilística, es decir, que existan cierta

probabilidad de escoger un modo respecto de otro, basándose por ejemplo en estadística que puede ser obtenida a través de encuestas para determinar qué porcentaje aproximado toma una decisión u otra.

En cuanto a los tipos de interrupciones, podemos encontrar dos grandes categorías: las interrupciones largas y las interrupciones cortas. Las primeras, tal como se expresa en el estudio Mo et al. (2022), se refieren a situaciones en las cuales los pasajeros deben sí o sí escoger otro modo de transporte o tomar la decisión de no viajar, es decir, no pueden esperar a que se retome el servicio de metro, dentro de las cuales podría categorizarse como aquellas que duran más de una hora. Por el contrario, las interrupciones cortas están asociadas a situaciones en donde los usuarios efectivamente tienen la posibilidad de esperar a que se retome el servicio de metro, lo cual hace que cambien los patrones de elección de parte de los pasajeros al agregarse esta opción, tal como ocurre en el estudio de Su et al. (2023), en el cual, dentro de las opciones que existen de toma de decisión de parte del usuario, efectivamente se encuentra la alternativa de esperar hasta que el servicio se recupere. Por último, existe otro tipo de estudios que se concentra en estudiar interrupciones simultáneas, como por ejemplo el de M'cleod et al. (2017), en el cual a través de parámetros establecidos en el documento revisan si existe interferencia entre dos interrupciones que ocurren al mismo tiempo, comparándolas con los efectos de si ocurrieran cada una por separado.

La población a estudiar es otro aspecto abordado por la literatura existente, en donde existen principalmente dos opciones: la primera es preocuparse de todos los tipos de pasajeros, es decir, de quienes viajan por motivos de trabajo, por estudios, viajeros casuales, etc, lo cual, a priori parece complejo, mientras que por otro lado está la posibilidad de estudiar solo a los pasajeros que viajan regularmente y de manera definida, es decir, quienes todo el tiempo presentan un mismo origen y un mismo destino, como lo pueden ser en su gran mayoría los trabajadores y estudiantes, concepto utilizado en estudios como el de M'cleod et al. (2017) y el de Mo et al. (2022).

2.3 Oportunidad de investigación

Como ha quedado de manifiesto, la literatura especializada en el ámbito de las interrupciones de sistemas de metro se ha centrado en tratar de entender los efectos que este tipo de situaciones genera tanto para los usuarios como para el servicio en sí mismo. Para ello, una mirada ha sido determinar estocásticamente cuál es la probabilidad de que exista cierto tipo de interrupción y las consecuencias que trae en cuanto a cantidad de veces que no funcionará el servicio en su completitud, por lo que no estarán entregando un servicio de calidad a la población. La otra mirada, más específica, trata de indagar en medio de cada interrupción, para lograr comprender cuáles son los efectos in situ que estos traen ya sea a la misma red de metro, a una combinación con otros medios, etc. Debe destacarse también que las investigaciones han sido en redes que cuentan con múltiples vías de metro dentro de sus ciudades, haciendo que los comportamientos observados correspondan a situaciones en aquel contexto.

Es por ello que se hace imperante contar con una investigación de un sistema de metro que forme parte de una amplia red de transporte conformada no solo por el mismo y buses o micros, sino incluir las demás alternativas como pueden ser los vehículos privados y los buses auxiliares, y esto considerarlo dentro de las opciones que tienen los usuarios en una interrupción de su servicio, al igual que otras como la opción de no viajar, etc. Todo esto en un contexto diferente al que se presentó en los diversos estudios, relacionado más a una red de metro única en la región, lo que provoca una diferencia respecto del comportamiento que ya se ha observado, debido principalmente al incremento de la criticidad de la red de metro, al no existir otras redes circundantes similares para que las utilicen los individuos.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Analizar los impactos que tiene la interrupción del servicio de Metro Valparaíso en otros sistemas de transporte modelando el comportamiento de los usuarios para comprender los efectos en la red de transporte.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar parámetros que caractericen los fenómenos de interrupción del servicio de metro sobre la base de la literatura técnica especializada.
- Simular el comportamiento de las personas usuarias del servicio del Metro Valparaíso frente a diferentes escenarios de disrupciones.
- Proponer recomendaciones al servicio de Metro Valparaíso considerando el impacto que tienen las disrupciones en los usuarios y en los demás sistemas de transporte para contribuir a la gestión preventiva de este tipo de situaciones.

4 Metodología

El enfoque de la investigación es de carácter mixto, es decir, trata de recoger aspectos tanto en lo cuantitativo como en lo cualitativo, aunque principalmente más de lo primero. Esto es pues, por un lado, se busca encontrar un número o flujo de personas afectadas por la disrupción del sistema de metro y luego una medida de los impactos que estos generan en los otros modos de transporte, y por otro lado, se establecen recomendaciones en base a evaluaciones de los resultados anteriores para mejorar la gestión de estos sistemas. Por último, una parte de este estudio también puede considerarse como experimental, puesto que los escenarios a los que estarán expuestos los individuos serán variados y se podrá visualizar si el cambio de una disrupción de un tipo a otra o de un lugar a otro genera cambios en los resultados, aunque este tipo de enfoque sería con una menor profundización que los anteriores considerados puesto que no necesariamente se busca encontrar una relación causa-efecto entre ciertos parámetros o variables, en lo cual se basa aquel tipo de trabajos.

Para desarrollar la investigación, en primer lugar, se estudiará la red del Metro en Valparaíso en profundidad, para lograr una representación lo más adecuada posible para el modelo. En ello debe tomarse en cuenta los horarios en que funciona el servicio, la cantidad de estaciones y donde están ubicadas, la cantidad de usuarios que la utilizan en un día normal de funcionamiento, la frecuencia de trenes y el cómo varía esta a lo largo de día, los tiempos de viaje que existen entre cada par de estaciones, entre otras. Además, se debe conocer, aunque sea en menor profundidad, la red de transporte alrededor del sistema de metro, para comprender cuáles son los modos alternativos de transporte que tienen los usuarios al momento de una disrupción del servicio de metro y cómo estos funcionan a grandes rasgos.

Luego, se realizará una búsqueda acerca de las disrupciones más comunes que se han presentado al menos en los últimos años, lo cual nos permitirá establecer una categorización de incidentes y determinar cuáles son los escenarios de interés para la modelación. Para ello se recurrirá a información de sitios web que comenten acerca de las disrupciones que ocurren en la red del metro, a plataformas oficiales del servicio Tren Limache-Puerto, método por el cual comunican generalmente el momento en que ocurre una disrupción y la causa de ella también, entre otros.

Finalizado lo anterior, se comenzará el proceso de construcción del modelo en el programa de simulación, considerando todas las simplificaciones que haya que hacer respecto de la red original, siempre y cuando no se pierdan los fundamentos de la investigación ni una correcta representación de la red original y el comportamiento de los usuarios en ella.

Después procederá a recogerse toda la información necesaria para la construcción del modelo a través de las encuestas y se realizará la simulación a través de los distintos escenarios propuestos. Con ello se obtendrán los resultados de interés y se procederá al análisis de los mismos, para finalmente establecer las recomendaciones para la gestión de las disrupciones del servicio del Tren Limache – Puerto, dependiendo del tipo de la misma, duración, entre otras características.

4.1 Tipos de modelación

Como se analizó en los estudios que abarcan la temática presente en esta investigación, existen variadas formas de representar y modelar sistemas de infraestructura, y consigo sistemas de transporte existentes en las sociedades actuales, tales como los sistemas dinámicos, la modelación basada en agentes, modelos basados en teoría económica, eventos discretos, etc.

Para este trabajo, se decide utilizar, en primer lugar, la modelación basada en eventos discretos, esto dada la practicidad y similitud que tienen los procesos dados en los sistemas de metro con lo que por definición trata este tipo de modelación. Su practicidad recae en dos principales aspectos aunque ambos relacionados entre sí, primero, los procesos que se dan en las simulaciones tipo DES se basan en la premisa de que lo que ocurre entre el estado anterior al proceso y el siguiente, es decir, cuando finaliza el flujo, no entrega información adicional valiosa para la simulación pues lo relevante pasa a ser el cuánto se demora en realizar aquel proceso, más que lo que pasa dentro de él, y segundo, esto permite que los programas computacionales utilicen menos recursos y trabajen de manera más óptima al no tener

que recabar información durante el proceso, tal como se menciona en Grube et al. (2011) en donde se utiliza DES para representar los flujos del Metro de Santiago.

Por otro lado, también resulta atractivo considerar la modelación basada en agentes, esta pues interesa en el proceso de decisión de parte de los usuarios para utilizar un tipo de transporte adicional debido a la disrupción que se da, conteniendo características relevantes como el ser parte de un entorno dinámico el cual va variando constantemente tanto debido a la interrupción como a la llegada de distintos pasajeros teniendo que tomar la misma decisión, el que los agentes (en este caso los pasajeros) pueden tomar decisiones de forma autónoma, teniendo reglas de decisión propias, también pueden interactuar entre ellos, entre otras características. Esta idea puede verse reflejada en el estudio de Abel & Faust (2020), en donde los agentes (individuos) van decidiendo si ir a comprar alimentos en base a ciertos parámetros, y seleccionan un modo de transporte sobre el cual ir para cumplir con su objetivo.

Como queda de manifiesto, la situación de una disrupción de un servicio de metro y la posterior elección de un modo de viaje de parte de los usuarios y los efectos que estos producen en el sistema de transportes en general, puede verse beneficiado por ambos paradigmas de simulación, tanto por ABM como por DES. Esto al cada una recoger cada uno de los dos aspectos más importantes dentro de la simulación, pues mientras DES permite establecer un flujo de pasajeros entre un punto y otro (lo que puede ser entre las estaciones de la red de metro) no importando lo que pasa con los agentes entre una estación y otra, luego ABM permite ir dirimiendo el comportamiento de los usuarios al momento de la interrupción, para conocer cuál es la decisión que toman y ver cómo van afectando a los otros modos de transporte.

4.2 Software a utilizar

Múltiples programas y softwares se presentan en la literatura especializada en el tema, los cuales pueden cubrir variados aspectos sobre la modelación que se intenta realizar, tales como Matlab, Java, SimDimMetro, Anylogic, entre otros, cuales fueron mencionados en la revisión de la literatura existente hasta el momento.

Para este estudio, se decide utilizar el programa AnyLogic por las bondades que presenta en términos de sus herramientas de simulación, la practicidad y disponibilidad al momento de realizar este trabajo (cabe destacar que presenta una versión gratuita para estudiantes la cual tiene contiene la gran mayoría de características deseadas). Esto es referido principalmente a las capacidades que tiene de representar distintos tipos de modelación sobre sistemas de infraestructura, conteniendo los dos enfoques mencionados anteriormente, la capacidad de juntar ambos tipos de simulación en un mismo problema, y además teniendo la alternativa de presentar los resultados de la simulación en tiempo real a través de una interfaz gráfica.

En comparación con los demás programas mencionados, si bien también eran alternativas atractivas para la modelación del problema, no presentaban todas las características que hacen que AnyLogic sea lo más conveniente. Por ejemplo, DimSimMetro es un programa en el cual se puede detallar de muy buena manera las redes de metro, imponiendo distintas condiciones de operación, entre otras particularidades, sin embargo, no es capaz de representar elementos fuera de la red de metro, lo cual lo imposibilita para conocer luego el efecto en los demás sistemas de transporte, es decir, no logra poder realizar una simulación híbrida entre los enfoques propuestos. Por otro lado, programas como Matlab y Java no son especialistas en modelación de sistemas de infraestructura, lo que hace complejo tratar de realizar simulaciones de este tipo y más aún de híbridas, por lo demás no cuentan con una interfaz gráfica que haga poder visualizar de mejor manera los resultados y el desarrollo de la simulación, lo que haga poder comprender de mejor manera qué es lo que está ocurriendo durante la ejecución.

4.3 Obtención de datos

Para modelar el sistema de metro, se utilizó principalmente información pública que se encuentra en las páginas web oficiales de EFE Valparaíso, de las cuales se pueden obtener los horarios de funcionamiento del servicio, la definición de los horarios puntas y no puntas, la zonificación que se hace en grupos de estaciones, entre otros. Además, se utilizó la aplicación EFE Trenes de Chile, dentro de la cual se pueden

obtener los tiempos de viaje existentes entre cada par de estaciones, parámetro necesario para la modelación.

Respecto a la modelación de los individuos, la información se recabó a través de encuestas, dentro de las cuales se les indujo en determinados escenarios de disrupción para conocer cuál sería la decisión que tomarían en caso de ocurrir una u otra interrupción que afecte el servicio de metro. En ella también se consultó acerca de las estaciones en las cuales ingresan al sistema y en cuales luego salen del mismo, logrando establecer patrones en las decisiones que toman las personas dependiendo de sus características individuales.

Por último, se debe destacar también que se tienen reuniones con personal de EFE Valparaíso, dentro de la cual se solicita información acerca del flujo de pasajeros en un día laboral para obtener el patrón de comportamiento de un día normal de funcionamiento del metro, a lo cual entregaron información que hubo que completarla para obtener los datos necesarios.

4.4 Caso de estudio

En la Figura 2 se observa el mapa de la red del metro en estudio, el cual está ubicado en la Región de Valparaíso de Chile, y sus estaciones recorren las ciudades de Valparaíso, Viña del Mar, Quilpué, Villa Alemana y Limache.



Figura 2: Mapa red de Metro Valparaíso (Obtenido de Mapa-metro, n.d.)

Este servicio cuenta con 20 estaciones que recorren las ciudades a través de una doble vía ferroviaria electrificada de longitud total de 43 kilómetros, con una flota de 35 automotores eléctricos, funcionando para los usuarios entre las 6:00 y las 23:00 aproximadamente. La red cuenta con servicios adicionales intermodales como los trolebuses y ascensores, y en la estación terminal de Limache se pueden realizar combinaciones bus + metro para viajar a las ciudades de Limache Viejo, Quillota y La Calera.

En el Metro Valparaíso, se transportan diariamente más de 80.000 personas, y en el último año se transportaron en total de más de 20 millones de usuarios (EFE, 2025).

Cabe destacar que al momento de realizar este estudio se encuentra en proceso de construcción la estación Valencia, ubicada entre las estaciones El Salto y Quilpué, y se encuentran en proceso de incorporación al sistema 15 vagones de metro que permitirán ampliar la flota de la red.

Como parte de la red de transporte circundante a este servicio, por un lado se encuentran las micros, las cuales realizan diferentes recorridos dependiendo de su numeración, tanto de manera local, es decir, dentro de una misma comuna, como también intercomunal, las cuales pasan por más de una comuna. Por otro lado, también se encuentran los vehículos que funcionan a demanda, como lo son los taxis o los provenientes de plataformas digitales como Uber, Didi, etc. En cierto tipo de disrupciones el servicio de metro pone a disposición de sus usuarios buses auxiliares que realizan recorridos similares a los que realiza metro cuando este funciona normalmente para que las personas puedan utilizar aquella alternativa en virtud de la situación. Por último, también existen diferentes carreteras y caminos

disponibles tanto para los transportes públicos mencionados anteriormente como para los vehículos privados que realizan sus viajes de esta manera.

4.5 Modelación conceptual

En la Figura 3 se puede observar un esquema conceptual de la modelación, en donde dentro del sistema se distinguen dos secciones. En primer lugar, en la parte superior se observa lo correspondiente a la modelación tipo DES, dentro de la cual se incorporará todo lo concerniente a los recorridos que realizan los usuarios en una situación normal de funcionamiento de metro, es decir, las entradas de los pasajeros, los tiempos de espera en los andenes, los tiempos de demora entre cada estación, las salidas de los pasajeros, el tiempo entre el viaje de ida y el viaje de vuelta, etc. Es por ello que abarca tanto el tramo cuando no existe una disrupción (y las personas realizan su trayecto de manera normal) como también cuando efectivamente existe una disrupción.

Por otro lado, la parte de modelación tipo ABM entra en escena cuando existe una disrupción en la cual el tiempo de reposición del servicio ha superado lo que el usuario está dispuesto a esperar. Con ello, el pasajero está obligado a tomar una decisión la cual puede dividirse en dos categorías, primero podría decidir desistir del viaje y no llegar a su destino originalmente planificado, o bien, se incorpora a otro modo de transporte para continuar con su recorrido y llegar al destino impuesto desde un principio.

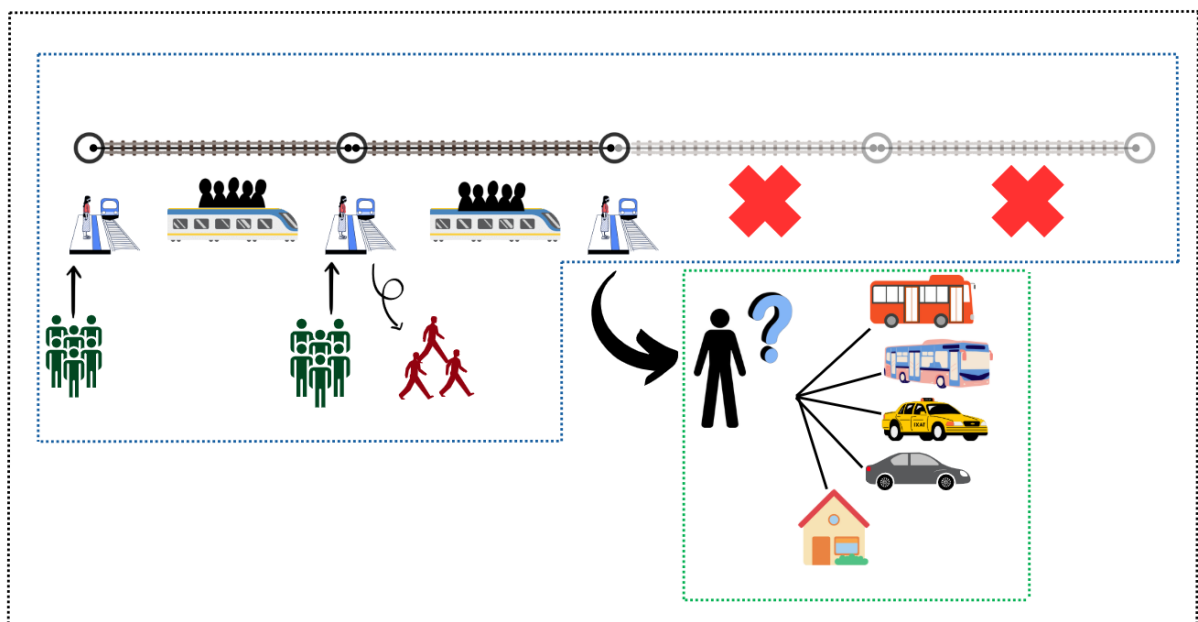


Figura 3: Esquema conceptual modelación.

En la Tabla 1 se pueden observar los parámetros que incidirán en la modelación relacionados a los agentes, junto a una breve descripción de lo que significan y cómo serán considerados en el modelo:

Tabla 1: Parámetros de agentes en la modelación.

Parámetros agentes	Descripción	Modelo
Estación subida en viaje de ida	Estación por la que el agente entra al sistema desde el hogar a su destino	Se inyectan "X" cantidad de pasajeros a cada estación por hora, según proporción por estadística de EFE
Estación bajada en viaje de ida	Estación por la que el agente sale del sistema provisoriamente (destino)	Se define al momento de entrar por una estación, según probabilidad por encuestas

Estación subida en viaje de vuelta	Estación por la que el agente entra al sistema desde el destino a su hogar	Será la escogida como destino en su viaje de ida
Estación bajada en viaje de vuelta	Estación por la que el agente definitivamente sale del sistema	Será la escogida como origen en su viaje de ida
Hora de entrada	Hora a la que entra el agente a la simulación	Entran “X” cantidad de pasajeros por hora a cada estación, distribuidos uniforme en la hora
Hora de salida	Hora a la que sale el agente	Dependerá de la estación en que baje y los tiempos entre estaciones
Decisión frente a disrupción	Qué hace el agente frente a una disrupción	Dependerá de la situación (se obtendrá de encuestas)
Tiempo máximo de espera reposición servicio	Cuánto está dispuesto a esperar el agente para que se reponga el servicio	Se obtendrá de encuestas
Donde se encuentra al ocurrir la disrupción	En donde está el agente al momento de la disrupción	Cuando llega a cada estación o entra a la simulación se pregunta si existe una disrupción
Tiempo entre viaje de ida y de vuelta	Cuánto tiempo pasa entre el viaje que realiza en una dirección y en la otra	Según una distribución de probabilidad que contiene el número de horas promedio que trabaja una persona en Chile

En la Tabla 2 se pueden observar los parámetros que incidirán en la modelación relacionados al sistema de metro, junto a una breve descripción de lo que significan y cómo serán considerados en el modelo:

Tabla 2: Parámetros del sistema de metro en la modelación.

Sistema metro	Descripción	Modelo
Horario de servicio	Entre qué horarios hay metro	Se controlará haciendo entrar a agentes hasta cierta hora
Hora punta/fuera de punta	Cuando el metro está en hora punta o no	Se obtendrá de EFE, influyendo en la frecuencia de trenes
Frecuencia trenes	Cada cuánto pasa el metro	Se simula a través de elementos “wait”, disparándose cada 6 o 12 min según corresponda
Disrupción Sí/No	Si es que existe una disrupción o no	Se controlará en la simulación cuando y cuánto duran
Existencia buses auxiliares	Si es que existen buses que pone metro	Solo se considerarán en los casos de disrupciones medias y graves

Notamos de inmediato que el principal parámetro a variar será la existencia de una disrupción o no, su duración y donde ocurre. Estas serán identificadas en 3 categorías: leve, mediana y grave. En la Tabla 3 se da la explicación de cada una de estas:

Tabla 3: Tipos de interrupciones consideradas.

Tipo de interrupción	Significado
Leve	Retraso en el funcionamiento normal del metro
Media	Cierto tramo de la red deja de estar operativo
Grave	Toda la red deja de estar operativa

Cabe destacar que tanto para determinar en qué lugar del metro se encuentran los usuarios al ocurrir la interrupción, como para definir los casos de los tipos de interrupción, se utiliza la división presentada por EFE, en donde la zona A está compuesta por las estaciones entre Puerto y El Salto, la zona B por las estaciones entre Quilpué y Peñablanca, y la zona C compuesta por la estación Limache.

4.6 Implementación computacional

En la Tabla 4 se pueden observar los parámetros que incidirán en la modelación relacionados a los agentes y los valores que tomarán estos:

Tabla 4: Valores de parámetros de agentes en la modelación.

Parámetros agentes	Valores
Estación subida en viaje de ida	Limache, Villa Alemana, Quilpué, Viña del Mar o Francia
Estación bajada en viaje de ida	Villa Alemana, Quilpué, Viña del Mar, Francia o Puerto
Estación subida en viaje de vuelta	Villa Alemana, Quilpué, Viña del Mar, Francia o Puerto
Estación bajada en viaje de vuelta	Limache, Villa Alemana, Quilpué, Viña del Mar o Francia
Hora de entrada	Entre las 6:00 y las 12:00
Hora de salida	Dependerá de la estación en que baje y los tiempos entre estaciones
Decisión frente a interrupción	Micro, Buses auxiliares, Vehículo Privado, Taxi/Uber o No viaja
Tiempo máximo de espera reposición servicio	Distribución según encuestas, entre 10 y 100 minutos
Donde se encuentra al ocurrir la interrupción	En viaje de ida, en viaje de vuelta o al ingresar al sistema
Tiempo entre viaje de ida y de vuelta	Según una distribución normal con promedio 9 horas

En la Tabla 5 se pueden observar los parámetros que incidirán en la modelación relacionados al sistema de metro y los valores que tomarán estos:

Tabla 5: Valores de parámetros del sistema de metro en la modelación.

Parámetros Sistema metro	Valores
Horario de servicio	Entre las 6:00 y las 23:00 horas
Hora punta/fuera de punta	Hora punta: 6:30 a 9:29 y 16:00 a 19:59 Hora fuera de punta: Horarios no contenidos en la categoría anterior
Frecuencia trenes	6 minutos en hora punta, 12 minutos en hora fuera de punta

Como se dijo anteriormente, el parámetro a variar será la existencia de una disrupción o no, su duración y donde ocurre. En la tabla 6 se muestran los diferentes casos de disrupciones que existirán en la simulación:

Tabla 6: Tipos de disrupciones implementadas en la modelación.

Nº	Tipo	Disrupción
1	Leve	Retraso en el funcionamiento de 30 minutos a las 8:00
2		Retraso en el funcionamiento de 30 minutos a las 11:00
3		Retraso en el funcionamiento de 30 minutos a las 18:00
4		Retraso en el funcionamiento de 60 minutos a las 8:00
5		Retraso en el funcionamiento de 60 minutos a las 11:00
6		Retraso en el funcionamiento de 60 minutos a las 18:00
7	Media	Tramo Limache – El Salto no funciona por 120 minutos a las 8:00
8		Tramo Limache – El Salto no funciona por 120 minutos a las 11:00
9		Tramo Limache – El Salto no funciona por 120 minutos a las 18:00
10		Tramo Quilpué – Puerto no funciona por 120 minutos a las 8:00
11		Tramo Quilpué – Puerto no funciona por 120 minutos a las 11:00
12		Tramo Quilpué – Puerto no funciona por 120 minutos a las 18:00
13	Grave	Toda la red no funciona por 120 minutos a las 8:00
14		Toda la red no funciona por 120 minutos a las 11:00
15		Toda la red no funciona por 120 minutos a las 18:00

Existen diferentes puntos sobre los cuales basar estos escenarios de disrupción. En primer lugar, respecto de las duraciones, como ya se mencionó con anterioridad, existen las disrupciones cortas y las disrupciones largas, siendo estas últimas las que tienen una duración generalmente mayor a 60 minutos, puesto que con ello se hace el supuesto de que las personas están obligadas a abandonar el sistema, luego por ello es que las disrupciones leves (en donde las personas estarán dispuestas a esperar determinado tiempo hasta salir del sistema) son de 30 y 60 minutos, mientras que las disrupciones tipo medio y grave son de 120 minutos, para asegurarnos de que los supuestos establecidos se cumplan con seguridad. Por otro lado, se escoge realizarlos a las horas mencionadas debido a la categorización de horas punta que presenta metro, pues a las 8:00 está dentro de la hora punta mañana, a las 18:00 está dentro de la hora punta tarde, y a las 11:00 simplemente está fuera de hora punta. Todo lo anterior es además respaldado por las reuniones con personal de EFE Valparaíso, en donde se les presentaron estos escenarios de

disrupción (y todo lo relacionado a la metodología de la investigación), a lo que no se presentaron observaciones ni sugerencias de cambios que realizar.

4.7 Limitaciones del estudio

Las limitaciones presentes en el estudio tienen que ver con diferentes temáticas relacionadas a la muestra de los datos, consideraciones de la modelación computacional, el alcance de la investigación, entre otros.

En primer lugar, se han registrado un total de 137 respuestas a las encuestas realizadas, las cuales muchas fueron respondidas de manera online, lo que no hace posible distinguir ciertas características de los usuarios que puedan inducir un sesgo en los resultados, como por ejemplo la edad de la persona, su nivel económico, el motivo del viaje, su género, etc. Junto con ello, se destaca que solo se considera a los pasajeros regulares, existiendo una incorrecta extrapolación de las decisiones a este número de usuarios, puesto que un individuo que tiene un viaje esporádico, lo más probable es que tenga un patrón de comportamiento distinto al de un pasajero regular.

Además, a través de EFE Valparaíso solo fue posible acceder a los datos de afluencia de público desde las 6:00 hasta las 9:00 de un día laboral cualquiera, por lo que se tuvo que realizar una extrapolación de estos datos para obtener el flujo de pasajeros entre las 9:00 y las 12:00 haciendo una distribución espejo respecto a la que ya se tenía, es decir, entre las 9:00 y las 10:00 se utilizaron los mismos datos que lo entregados entre 8:00 y 9:00, y así con las otras franjas horarias. Esto se hizo para poder contabilizar en su gran magnitud a todos los pasajeros que se incluyen en el estudio, pues quienes realizan los viajes a estas horas son quienes principalmente pueden considerarse como regulares, por lo que concuerdan con las hipótesis de este estudio.

Por otro lado, existen consideraciones de la modelación que hacen que se pueda simplificar el problema, por ejemplo, no existen elementos como los trenes que recojan pasajeros y pasen cada cierto tiempo, sino que este aspecto se trata a través de una acumulación de pasajeros en los andenes de las estaciones, para luego ser todos liberados de aquella zona cada 6 o 12 minutos según corresponda, simulando el paso de los trenes. Por otro lado, solo se consideran las estaciones con más afluencia de público para la modelación, esto para no complejizar tanto el proceso de la obtención de los resultados en el programa, haciendo que los usuarios de las estaciones que no se ven representadas sean distribuidos a las estaciones que sí lo están. Por último, consideramos que los usuarios entran y salen por la misma estación tanto de ida como de vuelta, algo que podría no ser tan preciso puesto que el usuario podría tener un destino distinto o subirse en una estación distinta, o simplemente no realiza uno de los dos viajes en el día. Cabe destacar que todas estas simplificaciones, si bien hacen que la representación no sea exacta del sistema, no pierden de foco los objetivos del estudio, al tratar de cuantificar la cantidad de personas que estarán utilizando los otros sistemas de transporte debido a cierta interrupción, existen detalles en el orden de magnitud de los minutos que lo hacen no ser significantes si los comparas con el sistema de un día completo.

Por último, respecto de los resultados obtenidos, estos no podrían ser necesariamente extrapolables a otros casos de estudio, sobre todo a aquellos donde se presentan servicios de metro multilínea pues, como ya se ha mencionado anteriormente, los patrones de comportamiento podrían variar considerablemente. Por otro lado, el impacto analizado se limita a los efectos sobre la red de transporte y no a otros aspectos como los económicos, sociales o psicológicos de los usuarios, los cuales no han sido considerados en la modelación.

5 Resultados

A continuación, se muestran y describen los resultados de 3 escenarios de simulación realizados, uno de cada tipo de disrupción. Cabe destacar que cada gráfico de los ejemplos existe para los 15 diferentes escenarios que se propusieron, pero se muestran solo 3 para ejemplificarlos de manera más óptima:

Disrupción leve de 30 min a las 8:00 (escenario N°1)

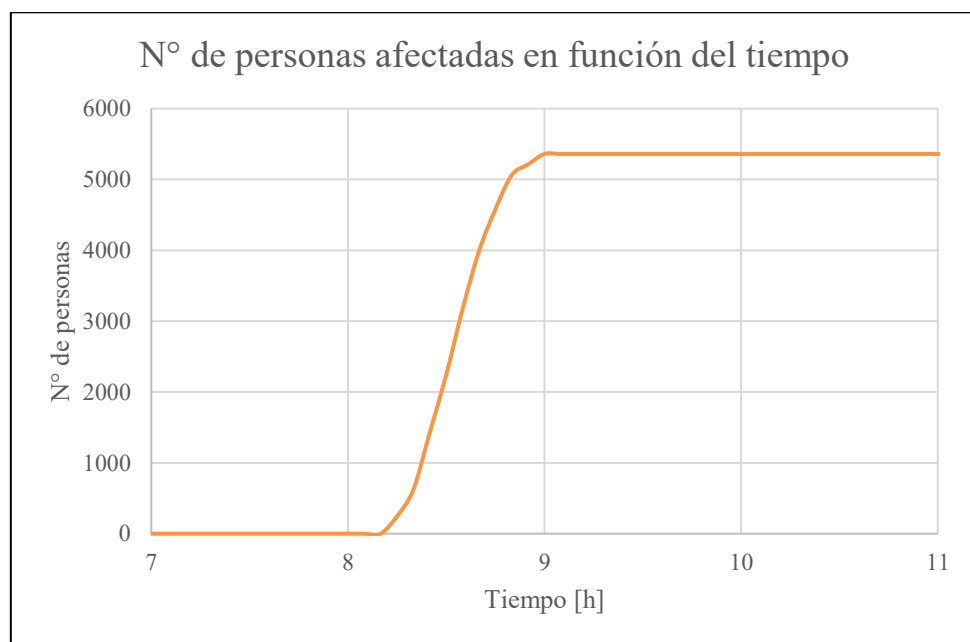


Figura 4: Número de personas afectadas por la disrupción en función del tiempo para el escenario N°1.

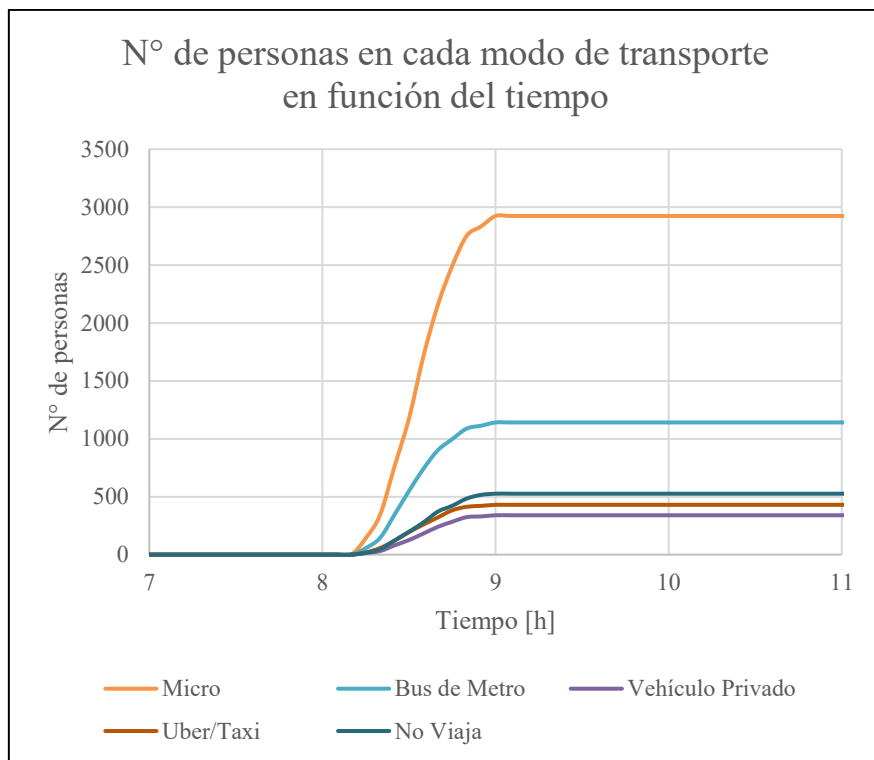


Figura 5: Número de personas agregadas a cada modo de transporte en función del tiempo para el escenario N°1.

En la figura 4 se puede observar la cantidad de personas que se ven afectadas por la disrupción impuesta (escenario N°1) en función del tiempo. Notamos que un poco pasada las 8:00 horas, comienza a aumentar el n° de personas afectadas, llegando a unas 2.200 a las 8:30 horas y a unas 5.300 en total cerca de las 9:00 horas, donde ya se estabiliza el número. La explicación de por qué no comienza a aumentar inmediatamente a las 8:00 horas la cantidad de usuarios afectados se entendería debido a que los usuarios, al ocurrir una paralización del sistema de metro (recordar que es una disrupción de tipo leve), no salen inmediatamente del sistema pues aguardan el tiempo máximo que están dispuestos a esperar para que se reponga el servicio, y cuando se excede este límite es cuando recién comienzan a abandonar el metro. Algo similar ocurre en la finalización de la disrupción, pues no ocurre que la cantidad de personas afectadas se estabiliza a los 30 minutos (que es lo que dura la interrupción), sino que hasta alrededor de las 9:00 sigue aumentando este número, lo cual podría explicarse debido a que las personas en teoría no saben cuánto va a durar la disrupción, luego a las 8:29 seguirá saliendo gente, la cual demorará un tiempo en salir del sistema e ingresar a otro modo de transporte, y por lo demás, mucha gente a la que le llega la información de que el metro está detenido.

En la figura 5, se puede visualizar el número de personas que están optando por cada una de las opciones en función del tiempo debido a la disrupción impuesta. En el se puede ver que pasada las 8:00 horas, este número comienza a aumentar en todas las opciones, donde a las 8:30 horas hay alrededor de 1.200 usuarios que optan por utilizar las micros, unos 550 que optan por utilizar los buses auxiliares de metro, unos 130 deciden utilizar un vehículo privado, un poco menos de 200 utilizan servicios tipo Uber o Taxi y una cantidad similar que deciden no viajar. Por otro lado, cercano a las 9:00 horas, cuando se estabilizan estos números, la cantidad de usuarios pasan a ser un total de 3.000 en micros, 1.100 en buses de metro, unas 350 con vehículo privado, unos 430 tanto que utilizan Uber o Taxi, y finalmente unos 530 que deciden no viajar. Las mismas explicaciones anteriores rigen en cuanto al momento en que comienzan a agregarse usuarios a cada modo de transporte y el momento en que esto deja de aumentar.

Disrupción media del tramo Limache – El Salto de 120 min a las 11:00 (escenario N°8)

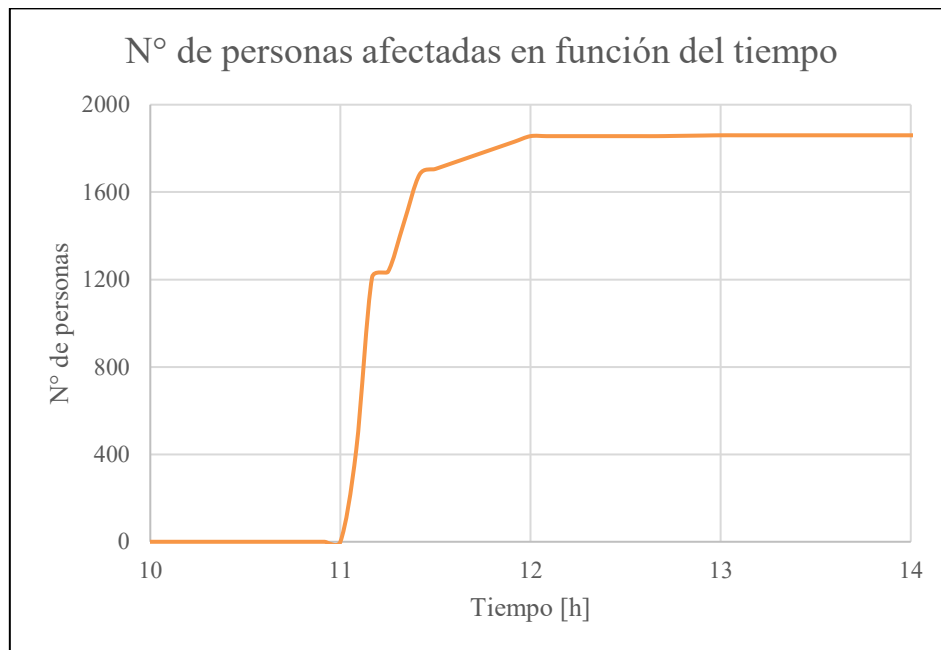


Figura 6: Número de personas afectadas por la disrupción en función del tiempo para el escenario N°8.

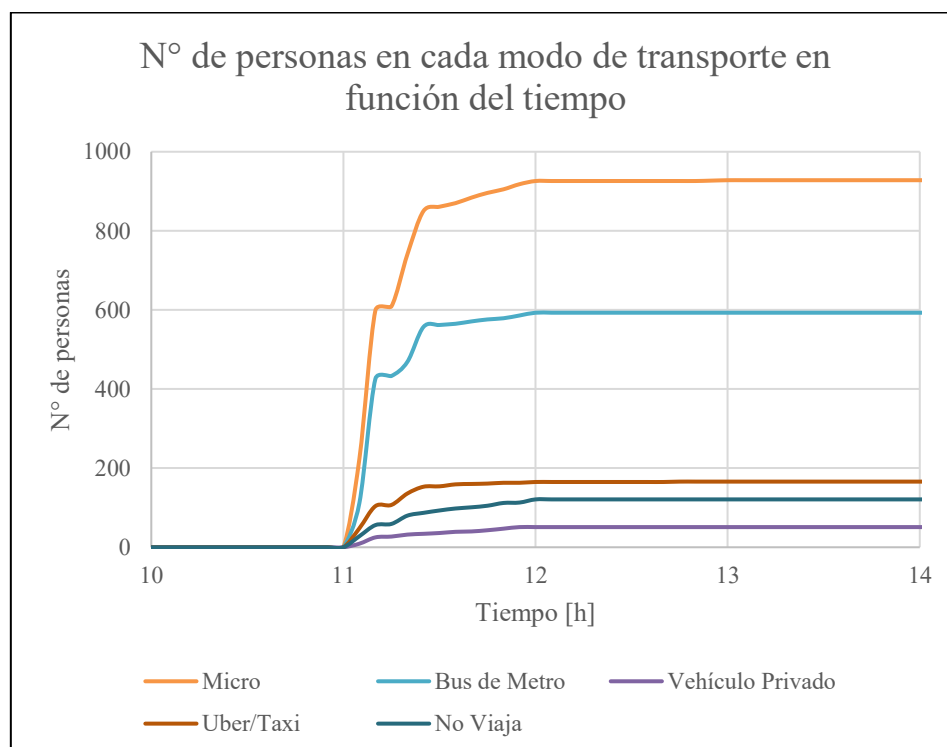


Figura 7: Número de personas agregadas a cada modo de transporte en función del tiempo para el escenario N°8.

En la figura 6 se puede observar la cantidad de personas que se ven afectadas por la disrupción impuesta (escenario N°8) en función del tiempo. Notamos que inmediatamente a las 11:00 horas, comienza a aumentar el n° de personas afectadas, llegando a unas 1.850 a las 12:00 horas y a unas 1.860 en total a las 13:00 horas, donde ya se estabiliza el número pues ha finalizado la disrupción. En este caso no ocurre lo de que hay un tiempo entre que comienza la disrupción y la gente comienza a salir del sistema ya que, al ser una disrupción del tipo media, es un tramo del servicio el cual deja de funcionar automáticamente a la hora señalada, por lo que la gente no puede esperar a que se reponga el servicio (bajo los supuestos declarados en la literatura de que en disrupciones largas las personas sí o sí deben abandonar el sistema). Misma analogía para el caso de la estabilización del resultado.

En la figura 7, se puede visualizar el número de personas que están optando por cada una de las opciones en función del tiempo debido a la disrupción impuesta. En el se puede ver que a las 11:00 horas, este número comienza a aumentar en todas las opciones, donde a las 12:00 horas hay alrededor de 930 usuarios que optan por utilizar las micros, unos 600 que optan por utilizar los buses auxiliares de metro, unos 50 deciden utilizar un vehículo privado, alrededor de 160 utilizan servicios tipo Uber o Taxi y unas 120 que deciden no viajar. Por otro lado, a las 13:00 horas, estos números aumentan levemente, pero son bastante similares a los anteriores, lo que se debe principalmente a la distribución horaria de pasajeros que entran al sistema, pues los pasajeros entran hasta las 12:00 horas aproximadamente. Las mismas explicaciones anteriores rigen en cuanto al momento en que comienzan a agregarse usuarios a cada modo de transporte y el momento en que esto deja de aumentar.

Disrupción total de 120 min a las 18:00 (escenario N°15)

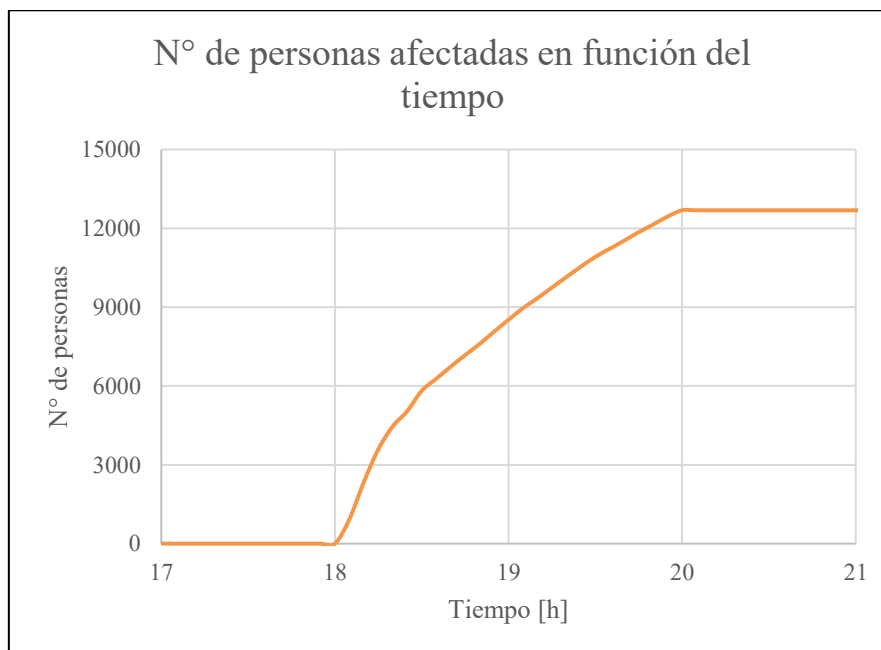


Figura 8: Número de personas afectadas por la disrupción en función del tiempo para el escenario N°15.

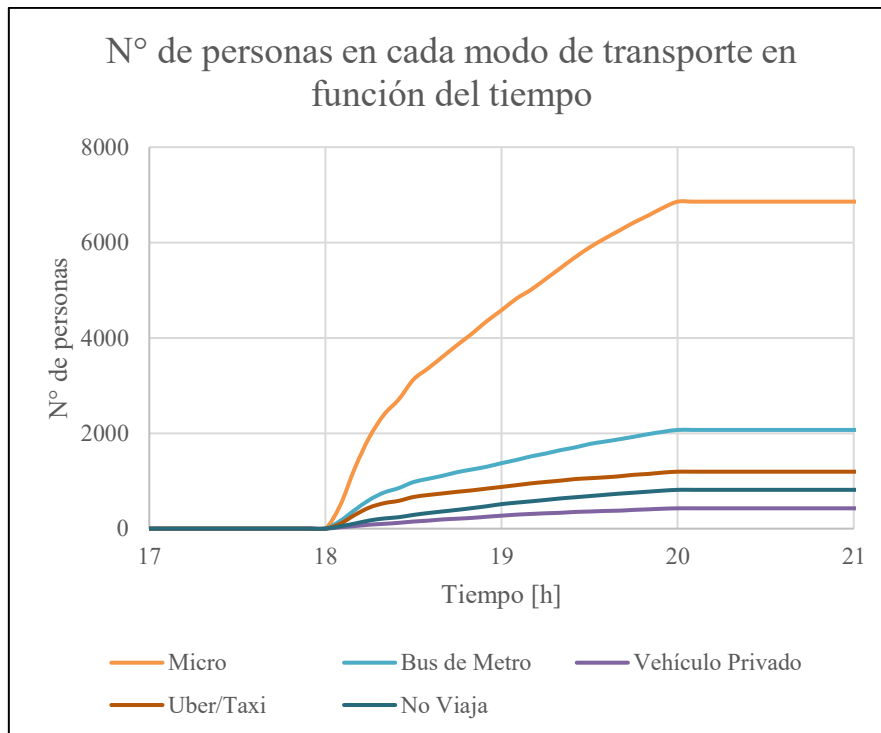


Figura 9: Número de personas agregadas a cada modo de transporte en función del tiempo para el escenario N°15.

En la figura 8 se puede observar la cantidad de personas que se ven afectadas por la disrupción impuesta (escenario N°15) en función del tiempo. Notamos que inmediatamente a las 18:00 horas, comienza a aumentar el n° de personas afectadas, llegando a unas 8.500 a las 19:00 horas y a unas 13.000 en total a las 20:00 horas, donde ya se estabiliza el número pues ha finalizado la disrupción. En este caso tampoco ocurre lo de que hay un tiempo entre que comienza la disrupción y la gente comienza a salir del sistema por las mismas razones que el caso de una disrupción tipo media, y la misma analogía se cumple para el caso de la estabilización del resultado.

En la figura 9, se puede visualizar el número de personas que están optando por cada una de las opciones en función del tiempo debido a la disrupción impuesta. En el se puede ver que a las 18:00 horas, este número comienza a aumentar en todas las opciones, donde a las 19:00 horas hay alrededor de 4.500 usuarios que optan por utilizar las micros, unos 1.400 que optan por utilizar los buses auxiliares de metro, unos 270 deciden utilizar un vehículo privado, alrededor de 900 utilizan servicios tipo Uber o Taxi y unas 500 que deciden no viajar. Por otro lado, a las 20:00 horas, cuando se estabilizan estos números, la cantidad de usuarios pasan a ser un total de 7.000 en micros, 2.000 en buses de metro, unas 400 con vehículo privado, 1.200 que utilizan Uber o Taxi y unos 800 que deciden no viajar. Las mismas explicaciones anteriores rigen en cuanto al momento en que comienzan a agregarse usuarios a cada modo de transporte y el momento en que esto deja de aumentar.

6 Discusión

A continuación, se muestran tres diferentes análisis que se pueden realizar en base a los resultados obtenidos anteriormente:

Análisis de número total de personas afectadas por tipo de disrupción y por horario de ocurrencia

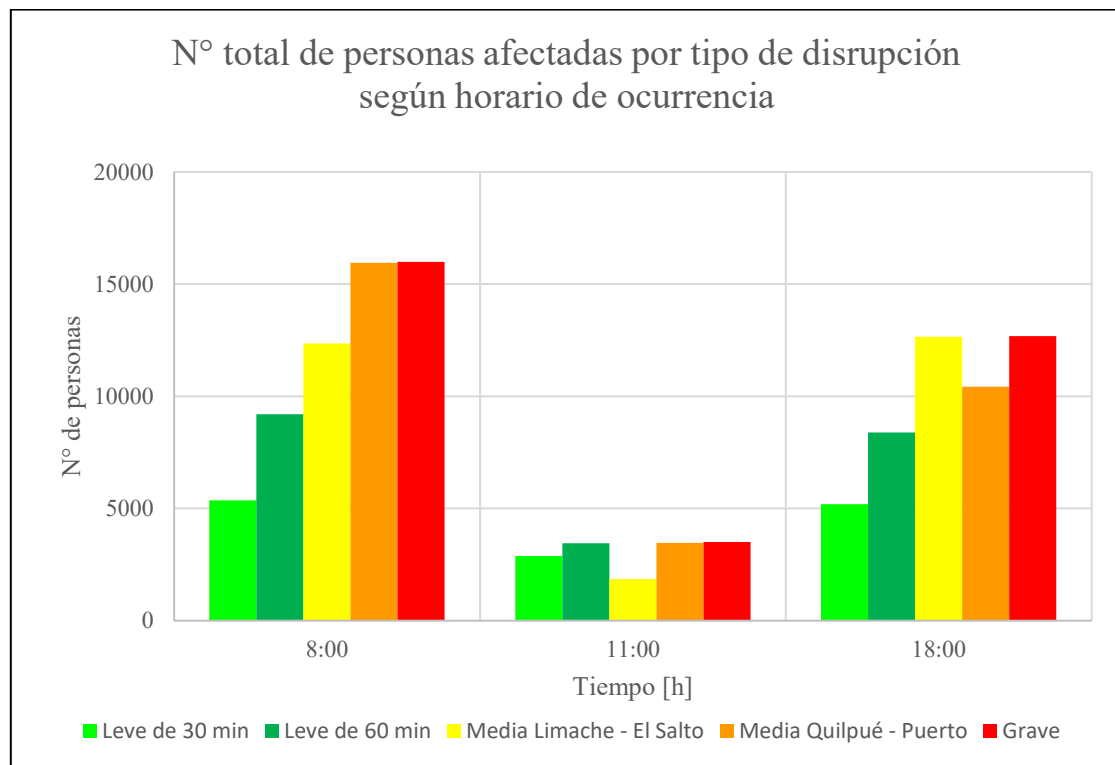


Figura 10: Número de personas afectadas por tipo de disrupción en función del horario de ocurrencia.

De la figura 10 pueden observarse diferentes características del fenómeno. En primer lugar, debe notarse que los valores máximos de personas afectadas para cada tipo de disrupción generalmente ocurren a las 8:00 horas, siendo, por consiguiente, los casos más críticos independiente del tipo de disrupción que sea. Si bien, existen disrupciones en que esto no se cumple (como el caso de la media Limache – El Salto), la diferencia de personas afectadas con respecto al horario con mayor afectación no es alta, por lo que de todas formas la hora punta de la mañana sigue siendo la más amenazante. Luego vendría la disrupción a las 18:00 horas, las cuales serían las con segundo valor más alto de personas afectadas por tipo de disrupción, mientras que las disrupciones ocurridas a las 11:00 presentan los valores más bajos de la magnitud mencionada, estableciéndose grandes diferencias respecto a los valores producidos con los otros horarios. Esto se vería explicado por la misma denominación de las zonas horarias de parte de EFE, en donde se condice el resultado de que en horas punta (8:00 y 18:00) existe una mayor cantidad de pasajeros utilizando el servicio que respecto a horas no puntas (11:00), y por tanto, una disrupción en un u otro horario incidirá de distinta manera.

Por otro lado, podemos analizar las variaciones de la cantidad de personas afectadas dentro de un mismo tipo de disrupción entre los escenarios de las 8:00 horas y de las 18:00 horas (que son los horarios más críticos). Por ejemplo, para una disrupción de tipo grave, en el primer caso se ven afectadas un total de 15.996 personas, mientras que en el segundo caso es un total de 12.687 personas, lo cual lleva a una diferencia de aproximadamente un 21% de usuarios totales afectados entre un escenario y otro. Si

realizamos el mismo procedimiento para los otros 4 tipos de disrupciones, podemos obtener que para el caso de las disrupciones tipo media Quilpué – Puerto la diferencia es de 35%, para las de tipo media Limache – El Salto la diferencia es de un 3%, para las de tipo leve de 30 min la diferencia es de un 3% y para las de tipo leve de 60 min es de un 9%, Esto nos muestra que las disrupciones graves y las de tipo media Quilpué – Puerto son quienes más sufren variaciones (mayores a un 20%), a diferencia de las tres restantes (disrupciones tipo leve y media Limache – El Salto), las cuales sufren una variación menor al 10%.

Por último, también se puede observar que el orden de criticidad de los tipos de disrupciones varía dependiendo del horario de ocurrencia de esta. Con esto se refiere a que, por ejemplo, para el caso de las 8:00 horas, las disrupciones que más usuarios afectados registran son las de tipo grave y la de tipo media Quilpué – Puerto, luego lo siguen escalonadamente las disrupciones de tipo media Limache – El Salto, la de tipo leve de 60 minutos y en último lugar la leve de 30 minutos. Sin embargo, para las disrupciones ocurridas a las 18:00, esto cambia y hace que la con más usuarios afectados sea la de tipo grave junto a la de tipo media Limache – El Salto, luego vienen las disrupciones de tipo media Quilpué – Puerto, la leve de 60 minutos y nuevamente en último lugar a la leve de 30 minutos. Esto quiere decir que dependiendo del horario en que ocurre la disrupción, habría que tomar más precauciones por cierto tipo de las mismas, por ejemplo, la de tipo media Quilpué – Puerto sería más importante en las horas de la mañana, mientras que la de tipo media Limache – El Salto lo sería más para las horas de la tarde.

Análisis de número total de personas agregadas a cada modo de transporte (o elección) por horario de ocurrencia

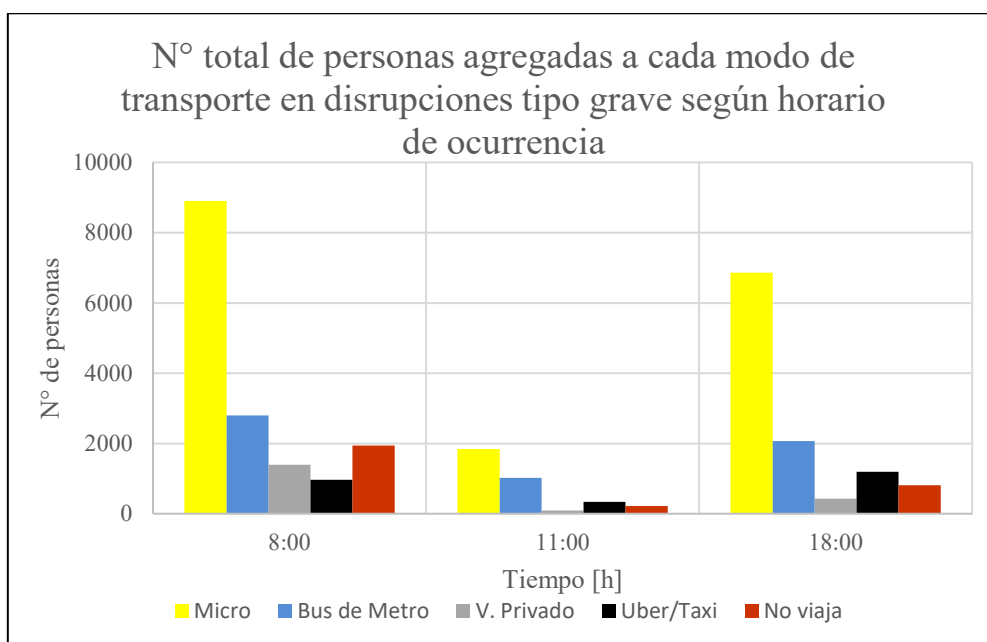


Figura 11: Número de personas que optan por cada decisión en disrupciones graves en función del horario de ocurrencia.

En la figura 11 se puede ver la cantidad total de personas que optan por cada decisión en los escenarios de disrupción grave en función del horario en que estas ocurren. Cabe destacar que existen cuatro gráficos más similares a este (uno por cada tipo de disrupción), los cuales se encuentran en anexos. En primer lugar, puede observarse que independiente del horario, la decisión con mayor cantidad de preferencias es la de utilizar micro frente a estos escenarios de disrupción, obteniendo alrededor de hasta el triple de elecciones que respecto a la segunda opción más utilizada, que corresponden a los buses

auxiliares que pone metro en todos los casos. Esto ocurre también para los demás tipos de disrupción (en los otros gráficos).

Otro aspecto observado es que las mayores diferencias entre pasajeros que escogen una decisión dependiendo de si es a las 8:00 o a las 18:00 (horas que representan mayor amenaza) se presentan tanto para las elecciones de vehículo privado como para la de no viajar, disminuyendo en un 70% y un 60% respectivamente. Esto se puede explicar debido a que las personas cuando van en su trayecto de ida (desde el hogar al trabajo), lo cual se hace durante las horas de la mañana, tienen la posibilidad de tomar su vehículo privado y realizar el viaje en aquel mismo, mientras que para el caso del viaje de vuelta (desde el trabajo al hogar), esta opción es mucho menos factible ya que, si es que no viajaron en su vehículo hacia el trabajo, no pueden utilizar este luego para devolverse. Por el lado de la opción de no viajar, ocurre algo similar, puesto que en su trayecto de ida, las personas tienen la opción de devolverse a sus hogares y no completar el viaje, mientras que en su trayecto de vuelta, esta opción se vuelve mucho menos probable ya que las personas no pueden no devolverse a sus hogares, aunque de todas maneras un porcentaje menor prefiere aquella opción.

Por último, puede destacarse que, si bien la mayoría de las opciones sufren una disminución en la cantidad de personas que deciden por las mismas cuando se compara la hora punta de la mañana con la hora punta de la tarde, la alternativa de tomar un modo de transporte tipo Uber o taxi es incluso ligeramente mayor en el caso de la disrupción ocurrida a las 18:00 horas. De esto se podría hipotetizar a que se debe a que las personas en su trayecto de vuelta, están menos tolerantes a este tipo de situaciones (quizá por cansancio o por apremio de llegar lo más rápido a su hogar), por lo que están dispuestos a incurrir en un mayor gasto económico para completar su viaje.

Análisis de número total de personas agregadas a cada modo de transporte (o elección) por tipo de disrupción

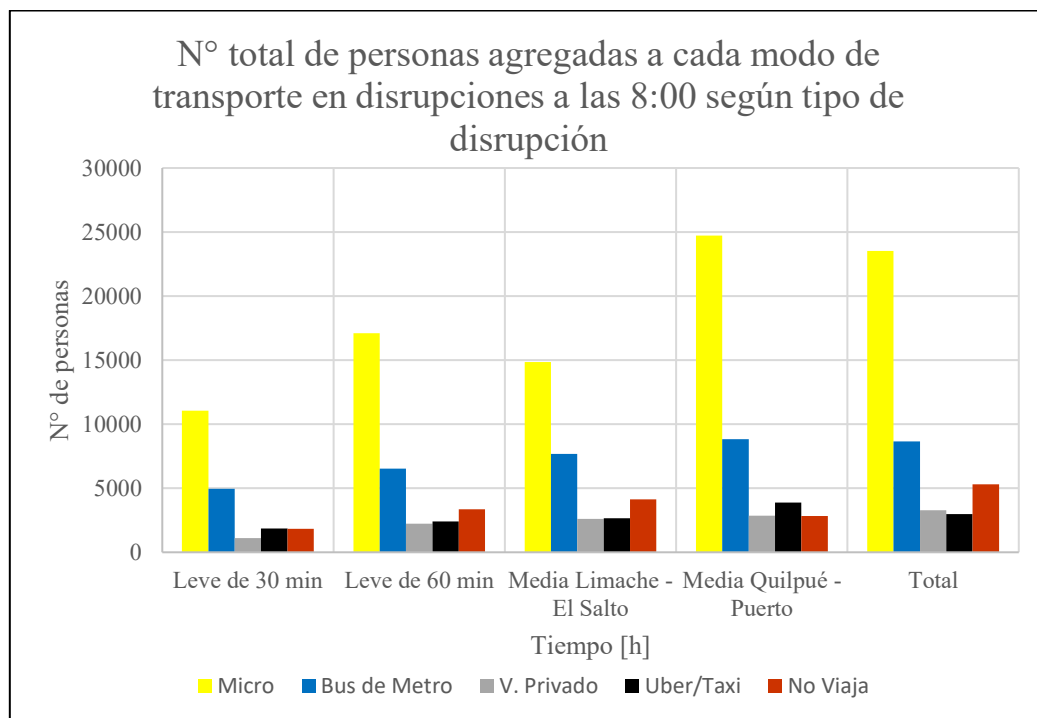


Figura 12: Número de personas que optan por cada decisión en disrupciones a las 8:00 horas en función del tipo de disrupción.

En la figura 12 se puede ver la cantidad total de personas que optan por cada decisión en los escenarios de disrupción ocurridos a las 8:00 horas en función del tipo de disrupción impuesta. Cabe destacar que

existen dos gráficos más similares a este (uno por cada horario de disrupción), los cuales se encuentran en anexos. En primer lugar, puede observarse que independiente del tipo de disrupción, y al igual que en el análisis anterior, la decisión con mayor cantidad de preferencias es la de utilizar micro, obteniendo entre el doble y el triple de elecciones que respecto a la segunda opción más utilizada, correspondiente a los buses auxiliares que pone metro. Esto ocurre también para los demás horarios de ocurrencia (los otros gráficos).

Si miramos por el lado de cada modo de transporte individual, notamos que el caso que más compromete al sistema de micros sería el de la disrupción tipo media Quilpué – Puerto con más de 9.000 usuarios que toman aquella decisión. Para el caso de los buses de metro ocurre exactamente lo mismo con cerca de 3.000 personas, aunque muy de cerca lo sigue la disrupción tipo total también, al igual que el caso anterior. Para los vehículos privados esto ocurre en la disrupción tipo total con aproximadamente 1.400 personas prefiriendo esta. Para los vehículos tipo Uber, el caso con más impacto sobre estos es el de tipo media Quilpué – Puerto con más de 1.300 personas. Finalmente, para el caso de la decisión de no viajar, la disrupción que genera una mayor cantidad de usuarios optando por aquella alternativa, es la de tipo total con cerca de 2.000 personas. Con esto, podemos obtener que, generalizando, los casos más críticos para cada sistema de transporte adyacente al servicio de metro corresponderían a la disrupción de tipo total y la de tipo media Quilpué – Puerto, luego sería en cuales habría que poner más atención en caso de generar planes de mitigación para los fenómenos que ocurran a las 8:00 horas. Realizando un análisis similar para el caso de las 11:00 y 18:00, nos damos cuenta de que la disrupción tipo total es la que generalmente obtiene un mayor número de afectados por decisión, por lo que correrían las mismas recomendaciones anteriores.

Recomendaciones a EFE Valparaíso

En primer lugar, y como ya se ha esbozado en el análisis de resultados que se ha presentado anteriormente, desde un punto de vista general se pueden establecer diferentes aseveraciones. Desde el punto de vista horario, las disrupciones ocurridas durante la hora punta de la mañana son quienes presentan mayor número de afectados, aunque seguidas desde cerca por las ocurridas durante la hora punta de la tarde, mientras que las ocurridas fuera de hora punta tienen una magnitud considerablemente menor a las anteriores. Desde el punto de vista del tipo de disrupción, está claro que las de tipo total son quienes más afectación generan en el sistema, sin embargo, dependiendo de si se está en la hora punta de la mañana o de la tarde, la otra disrupción que genera un número similar de usuarios afectados varía, pues durante las primeras horas del día, la disrupción tipo media Quilpué – Puerto es más perjudicial que la de tipo media Limache – El Salto, mientras que esta última cumple el mismo patrón pero en las horas de la tarde. Con esto entonces, puede establecerse una especie de jerarquía de disrupciones que puede ser tomada en cuenta por EFE Valparaíso para poner especial atención en cierto tipo de disrupciones, esto es, en las que ocurren durante la hora punta de la mañana y las que son del tipo total, mientras que en un segundo escalafón se presentarían las ocurridas durante la hora punta de la tarde, y de las disrupciones de tipo media, dependiendo de la clasificación horaria mencionada anteriormente.

Ahora bien, desde un punto de vista más detallado, se pueden obtener ciertas cantidades interesantes para quienes manejan y gestionan el servicio. Por ejemplo, con los resultados de usuarios afectados por cada tipo de disrupción, podemos establecer un orden de magnitud estimativo de la cantidad de trenes a los que equivalen la cantidad de personas que debieron abandonar el servicio. Según la memoria anual de EFE de 2024, cada unidad simple tiene en promedio una capacidad de 400 personas, luego, si consideramos el caso en donde existe una mayor cantidad de individuos afectados, la cual corresponde a la disrupción de tipo grave a las 8:00 con cerca de 16.000 usuarios afectados, se puede obtener que el efecto de este tipo de disrupción equivale a 40 unidades simples completamente llenas, las cuales dejan de circular y de llevar pasajeros, con todo lo que ello implica. Esto también puede repetirse para los demás escenarios que se realizaron, obteniendo los resultados pertinentes.

Por otro lado, relacionado con lo anterior, podría obtenerse la pérdida económica respecto de los pasajes que dejan de pagarse por parte de las personas al no poder utilizar el servicio de metro. Si consideramos nuevamente la disrupción de tipo grave a las 8:00, en la cual hubo un total de 16.000 usuarios afectados,

luego si este valor se multiplica por el costo promedio del pasaje en aquel horario, estadística la cual nosotros no contamos pero que seguramente EFE, se puede obtener el costo de pérdida mencionado anteriormente. Ahora bien, para mencionar un rango de valores, se puede preguntar cuales son las tarifas que se cobra por utilizar el servicio a través de la página web de EFE, con lo que se obtiene que la tarifa más barata sería de 191 pesos, y la más cara sería de 1.340 pesos a la hora mencionada. Con esto, se puede entender entonces que los costos de pérdida estarían aproximadamente entre los 3.000.000 de pesos y los 21.000.000 de pesos, aclarando que un valor que esté más al centro entre ambos sería el más probable, y que el dato exacto podría ser obtenido por la empresa que gestiona el servicio. Por lo demás, debe destacarse que este análisis podría realizarse para cada una de las interrupciones que se presentan en el estudio, y así EFE Valparaíso poder establecer niveles de amenaza económica respecto de los diferentes tipos de interrupciones, luego con ello saber donde y de qué manera establecer los recursos para mitigar este tipo de situaciones.

Respecto de las decisiones que toman los usuarios dependiendo de la interrupción que se da, una opción que se presentó como alternativa es la de utilizar el servicio de buses auxiliares que instala EFE, los cuales son puestos a disposición de las personas en ciertos casos de interrupción del servicio. El caso en que más usuarios optan por esta decisión es en la interrupción de tipo media Quilpué – Puerto, en la cual cerca de 2.900 personas son quienes deciden por utilizar este modo de transporte. Esto puede ser utilizado por EFE para obtener, por ejemplo, cuánta es la flota necesaria de estos buses para poder cumplir con la nueva demanda que se les está generando. Si imponemos un número estimado de personas que caben en un vehículo de este tipo, aproximadamente 50 personas (30 sentadas más 20 de pie), se puede obtener que el número de buses necesarios para este escenario, dividiendo el número total de personas que optan por esta alternativa, por la capacidad del vehículo, lo que nos da un total de 58 buses auxiliares.

Ahora bien, si EFE quisiera disponer de buses para que todos los usuarios afectados puedan continuar su trayectoria, tendría que realizarse lo mismo, pero ahora contabilizando el número total de afectados. Luego, en el peor caso, en el cual se veían 16.000 usuarios afectados, se necesitarían 320 buses auxiliares en total, es decir, más de 5 veces la cantidad que se necesita según la demanda actual. Cabe destacar que EFE puede estimar estas cantidades con mayor precisión, pues seguramente tienen de forma más severa el dato de la capacidad de los vehículos que ocupan, y realizando un proceso análogo al anterior, pueden ir estimando según cada escenario, la cantidad total de buses que necesitarán, y junto con ello, generar planes para gestionar las interrupciones del servicio.

Lo anterior también genera costos adicionales que debe cubrir la empresa que gestiona el servicio, luego si se multiplica la cantidad de buses totales necesarios con el valor que tiene poner en tránsito cada uno de estos, se puede obtener cuales son los costos asociados a la implementación de buses para los usuarios. Más aún, si a estos costos le sumamos los inducidos por la pérdida del pago de pasaje por parte de los usuarios, se podría obtener un estimativo de los gastos totales asociados a cada escenario de interrupción.

Si miramos desde un punto de vista integral el sistema de transporte del Gran Valparaíso, los valores obtenidos acerca de la cantidad de usuarios que optan por cada decisión, también pueden ser utilizados por las empresas en su conjunto para lograr mitigar de manera más óptima los efectos de las interrupciones. Esto es, por ejemplo, se pueden establecer coordinaciones con las empresas que manejan el sistema de micros, pues está claro que al ocurrir este tipo de situaciones, este modo de transporte se ve muy demandado, lo que genera una pérdida también en la entrega de la calidad de su servicio. Es por ello que los resultados obtenidos de cada escenario pueden ser utilizados para que EFE informe que el sistema de micros va a sufrir de cierta demanda, para que así estos últimos puedan organizarse y estar mejor preparados para atender a aquellos usuarios, mejorando así la calidad del viaje tanto para quienes utilizan el servicio de metro como para quienes ya utilizan el sistema de micros.

7 Conclusiones

La presente investigación realiza un análisis de interrupciones de los servicios de metro, específicamente del Metro Valparaíso, dentro de la cual se propone una modelación que contempla tanto los enfoques de los eventos discretos como de la basada en agentes, para cuantificar de alguna manera el impacto real que tienen las diferentes situaciones de interrupción, tanto en el propio sistema de metro como en los demás sistemas de transporte que acompañan a este en la función de trasladar personas dentro de la Región de Valparaíso.

En esta, se reconoce haber logrado una correcta identificación de los parámetros relevantes sobre interrupciones de los servicios de metro y de la red que forma parte la investigación. A través de la revisión sistemática de literatura que aborda estos temas en cuestión, se pudo entender y aplicar conceptos como el tiempo máximo que los pasajeros están dispuestos a esperar por un servicio, los diferentes tipos de escenarios de interrupción en función de su duración, la concepción de ser un pasajero regular, etc, los cuales incidieron directamente en la modelación realizada.

Por otro lado, también se logró la construcción de un modelo que es capaz de simular un sistema de metro (al menos de línea única), en el cual, a través del enfoque de una modelación basada en eventos discretos, se fue capaz de integrar los diferentes factores que repercuten en el funcionamiento de este, tales como los horarios de funcionamiento, frecuencia del paso de trenes, afluencia de público por cada estación, recorridos, etc.

Relacionado con lo anterior, no solo se fue capaz de construir un modelo que permite simular las condiciones normales de funcionamiento de metro, sino también se incluyó la posibilidad de que existan interrupciones del servicio, y junto con ello generar información estadística de aquellas situaciones. Para esto, se utilizó lo que es la parte concerniente a la modelación basada en agentes, dentro de la cual se pudo ir obteniendo y registrando la información de los pasajeros, tales como las estaciones de entrada y de salida del metro, los horarios a los cuales realizan sus viajes, sus preferencias de elección dada cierta interrupción, entre otros.

Por último, también se reconoce haber establecido recomendaciones al servicio de Metro Valparaíso, principalmente referido a presentar este modelo como una herramienta predictora de este tipo de situaciones, con la cual se puede categorizar las interrupciones, obtener los costos económicos asociados, diseñar planes de manejo de este tipo de fenómenos, entre otros, lo cual puede hacer que EFE mejore la forma en que gestiona su servicio.

Ahora bien, también se reconocen limitaciones dentro de la investigación, aspectos que no se lograron o al menos no en su totalidad. Es por ello que se proponen recomendaciones para futuras investigaciones, las cuales podrían obtener resultados aún más verídicos y mejorar el conocimiento en el tema.

En primer lugar, no se logró generar una representación fehaciente y exacta del sistema de metro en la modelación, pues elementos como los trenes no existen de manera directa en ella, sino que existen distintos procesos, flujos y tiempos de espera que emulan la llegada de un vehículo a recoger pasajeros, sin embargo, no existe este elemento como tal. Es por ello que para un próximo trabajo podrían efectivamente considerarse estos elementos dentro de la modelación explícitamente. Se debe destacar que este punto no invalida los logros mencionados anteriormente, ya que solo se está recalcando que la modelación simplemente no es perfecta.

Por otro lado, para una siguiente ocasión podrían considerarse no solo a la población de usuarios regulares, sino también a aquellos que realizan sus viajes de manera esporádica o sin una regularidad de días, horarios, etc. En esta investigación se realizó de aquella manera apoyado en la literatura del tema, ya que generalmente se trata de evitar la aparición de este tipo de usuarios, pues presentan un gran desafío al no seguir reglas tan establecidas a diferencia de los pasajeros regulares, pero se reconoce que considerarlos logrará una mejor representación de la realidad.

Otro aspecto a mejorar, podría ser el asegurar una mejor representatividad de los datos obtenidos a través de las encuestas. Esto ya que la gran mayoría de las respuestas que se obtuvieron para este trabajo fueron

accedidas a través de plataformas en línea, lo cual imposibilitó saber de donde proviene cada respuesta. Esto podría generar cierto sesgo en las estadísticas recabadas pues, por ejemplo, si nos vamos a un extremo, si solo la respondiesen estudiantes, la respuesta de ir en vehículo privado sería probablemente una opción muy poco frecuente, mientras que si las respondiesen solo trabajadores, lo más probable es que esta proporción sea bastante diferente. Es por ello que para una futura investigación podría considerarse esto, e incluso, si se profundiza más en ello, se podría establecer un perfil por respuesta y ver si existen ciertas correlaciones en las decisiones entre ciertos grupos de personas y comenzar a comprender también por qué terminan tomando las decisiones manifestadas.

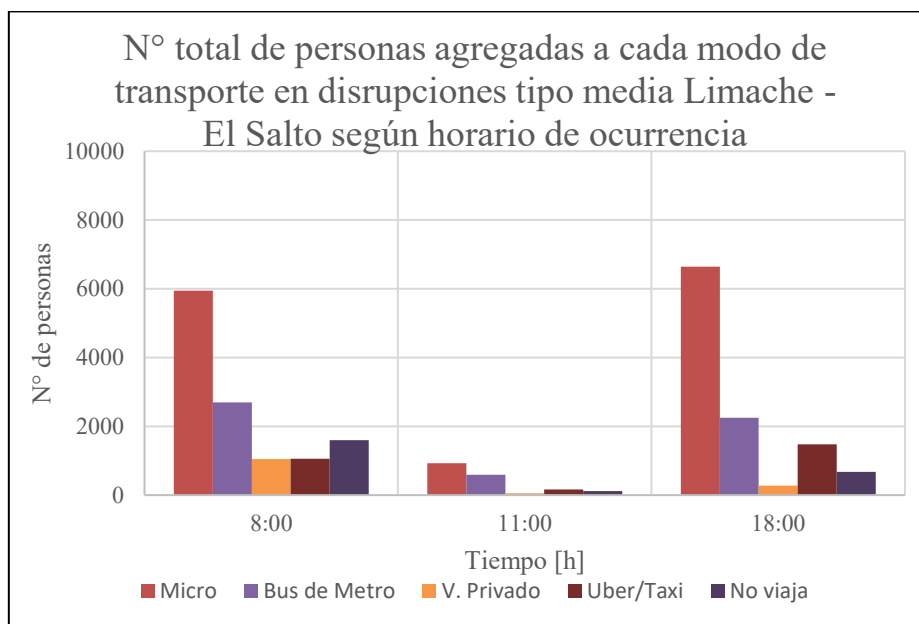
Por último, otra sugerencia podría ser complementar los resultados con el número de vehículos necesarios para cubrir la demanda de pasajeros que se está añadiendo a cada modo de transporte según el tipo de disrupción que ocurra. Esto podría mejorar las recomendaciones ya no solo al servicio de metro, sino también a los otros sistemas de transporte que se consideran, pues podría entregarse un valor estimado de la flota que se necesitaría para enfrentar de manera correcta estos fenómenos de disrupción para una gestión integral del sistema de transporte en su conjunto.

8 Referencias

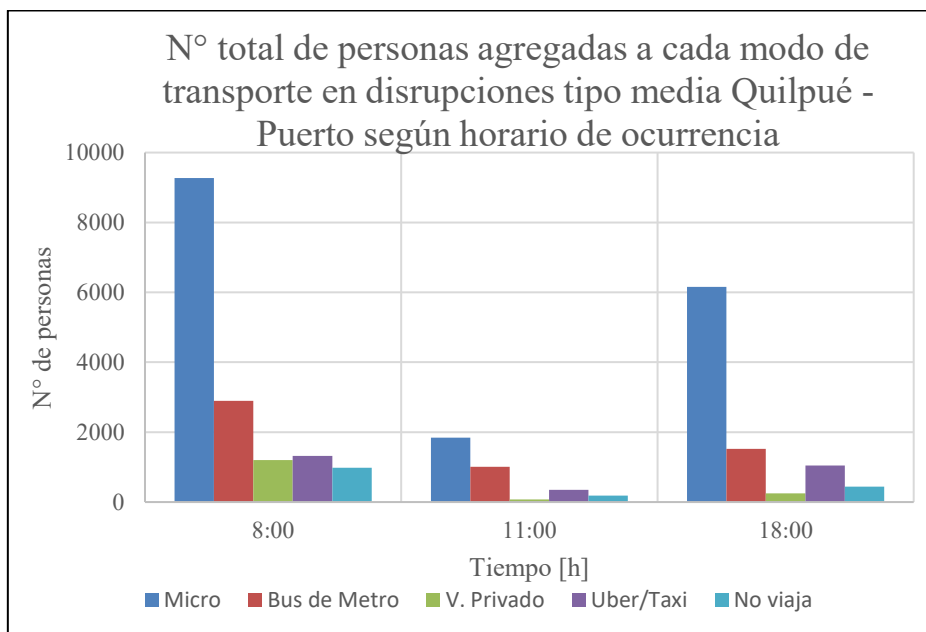
- Abel, K. C., & Faust, K. M. (2020). Modeling complex human systems: An adaptable framework of urban food deserts. *Sustainable Cities And Society*, 52, 101795. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101795>
- Abel, K. C., & Faust, K. M. (2022). Modeling urban systems: Comparing the efficacy of simulated interventions on the urban food environment. *Sustainable Cities And Society*, 78, 103627. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103627>
- Alanís, L. F. G. (2016). Infraestructura resiliente: desempeño sostenido en un mundo siempre cambiante. *Entretextos*, 8(24), 1-10. <https://doi.org/10.59057/iberoleon.20075316.201624347>
- Araya, F. (2022). Integration of discrete event simulation with other modeling techniques to simulate construction engineering and management: an overview. *Revista de la Construcción*, 21(2), 338-353. <https://doi.org/10.7764/rdlc.21.2.338>
- EFE (2025). Memoria Anual 2024. EFE Valparaíso
- Galván, L. J. S. (2023). Análisis de incidentes estructurales en el Sistema de Transporte Colectivo Metro (1992-2021) desde el enfoque de gestión de riesgos. *Encrucijada revista electrónica del Centro de Estudios en Administración Pública*, (43), 17-36. <https://doi.org/10.22201/fcpys.20071949e.2023.43.84383>
- Grube, P., Núñez, F., & Cipriano, A. (2011). An event-driven simulator for multi-line metro systems and its application to Santiago de Chile metropolitan rail network. *Simulation Modelling Practice And Theory*, 19(1), 393-405. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2010.07.012>
- Hajhashemi, E., Murray-Tuite, P. M., Hotle, S. L., & Wernstedt, K. (2019). Using agent-based modeling to evaluate the effects of Hurricane Sandy's recovery timeline on the ability to work. *Transportation Research Part D Transport And Environment*, 77, 506-524. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.011>
- Hasan, S., & Foliente, G. (2015). Modeling infrastructure system interdependencies and socioeconomic impacts of failure in extreme events: emerging R&D challenges. *Natural Hazards*, 78(3), 2143-2168. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1814-7>
- Ibáñez, E., Gkritza, K., McCalley, J., Aliprantis, D., Brown, R., Somani, A., & Wang, L. (2010). Interdependencies between Energy and Transportation Systems for National Long Term Planning. En *Springer eBooks* (pp. 53-76). https://doi.org/10.1007/978-3-642-11405-2_2
- Liu, K., Zhu, J., & Wang, M. (2021). An event-based probabilistic model of disruption risk to urban metro networks. *Transportation Research Part A Policy And Practice*, 147, 93-105. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.03.010>
- Louie, J., Shalaby, A., & Habib, K. N. (2017). Modelling the impact of causal and non-causal factors on disruption duration for Toronto's subway system: An exploratory investigation using hazard modelling. *Accident Analysis & Prevention*, 98, 232-240. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.10.008>
- M'cleod, L., Vecsler, R., Shi, Y., Levitskaya, E., Kulkarni, S., Malinchik, S., & Sobolevsky, S. (2017). Vulnerability of Transportation Networks: The New York City Subway System under Simultaneous Disruptive Events. *Procedia Computer Science*, 119, 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.158>
- Mapa-metro (n.d): Metro de Valparaíso. https://mapa-metro.com/es/Chile/Valparaiso/Valparaiso-Metro-mapa.htm#google_vignette (fecha de acceso: 30 de septiembre de 2025)
- Mo, B., Von Franque, M. Y., Koutsopoulos, H. N., Attanucci, J. P., & Zhao, J. (2022). Impact of Unplanned Long-Term Service Disruptions on Urban Public Transit Systems. *IEEE Open Journal Of Intelligent Transportation Systems*, 3, 551-569. <https://doi.org/10.1109/ojits.2022.3199108>

- Ouyang, M. (2014). Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 121, 43-60. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.06.040>
- Su, G., Si, B., Zhi, K., Zhao, B., & Zheng, X. (2023). Simulation-Based Method for the Calculation of Passenger Flow Distribution in an Urban Rail Transit Network Under Interruption. *Urban Rail Transit*, 9(2), 110-126. <https://doi.org/10.1007/s40864-023-00188-z>
- Wang, Z., Ma, W., & Chan, A. (2020). Exploring the Relationships between the Topological Characteristics of Subway Networks and Service Disruption Impact. *Sustainability*, 12(10), 3960. <https://doi.org/10.3390/su12103960>
- Zhang, L., Xu, M., & Wang, S. (2023). Quantifying bus route service disruptions under interdependent cascading failures of a multimodal public transit system based on an improved coupled map lattice model. *Reliability Engineering & System Safety*, 235, 109250. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109250>
- Zhao, B., Tang, Y., Wang, C., Zhang, S., & Soga, K. (2022). Evaluating the flooding level impacts on urban metro networks and travel demand: behavioral analyses, agent-based simulation, and large-scale case study. *Resilient Cities And Structures*, 1(3), 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.rcns.2022.10.004>

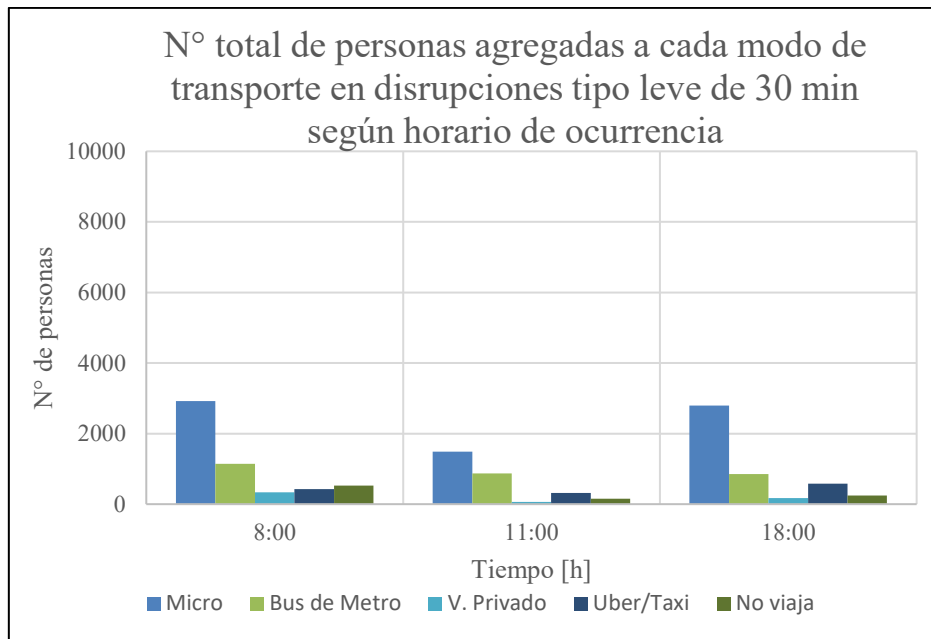
A. Anexos



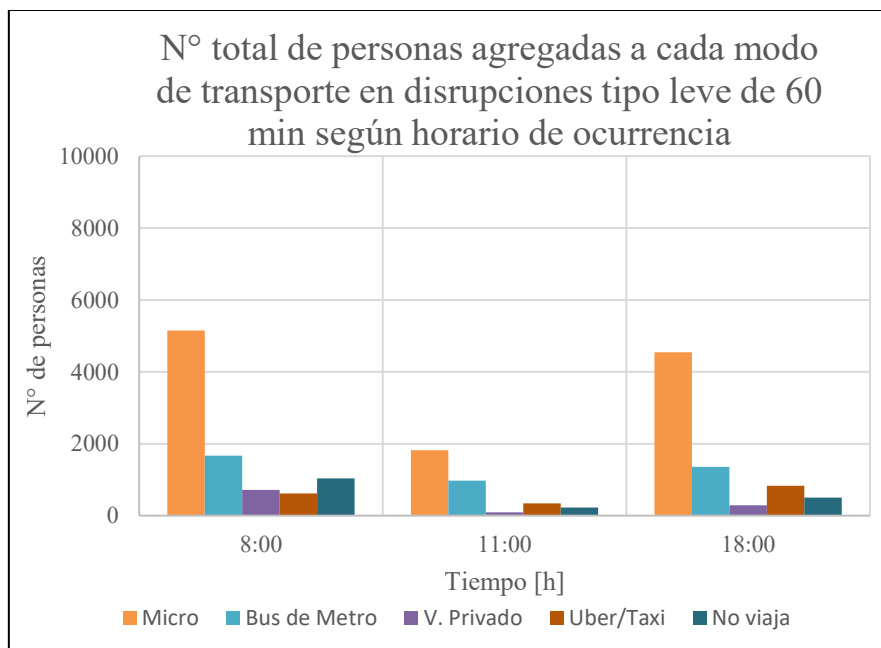
Anexo N°1: Gráfico de número de personas agregadas a cada modo de transporte en disrupciones tipo media Limache – El Salto según el horario de ocurrencia.



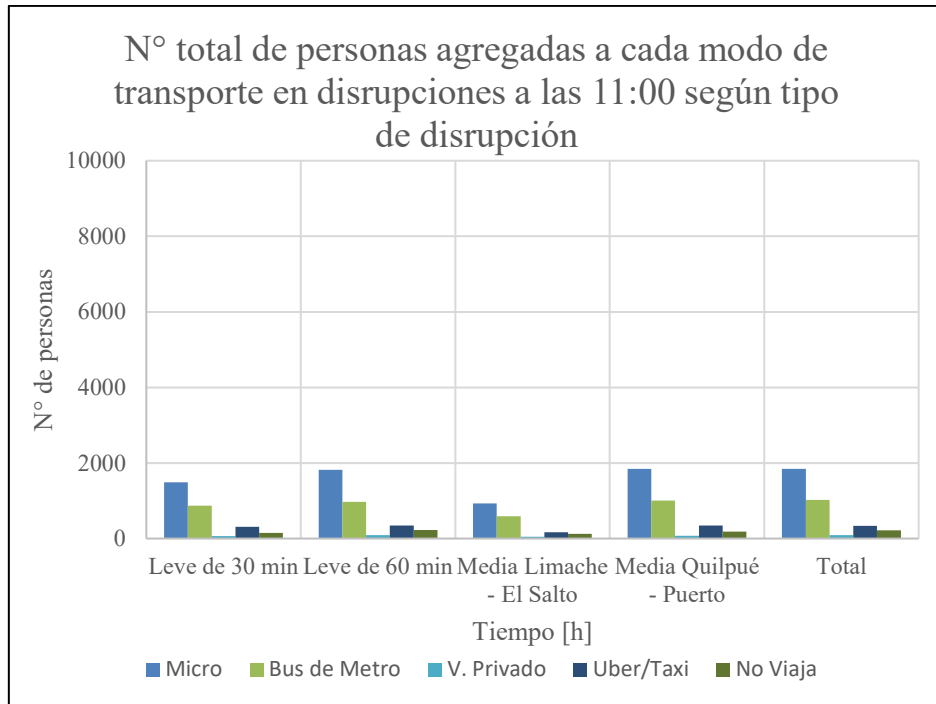
Anexo N°2: Gráfico de número de personas agregadas a cada modo de transporte en disrupciones tipo media Quilpué – Puerto según el horario de ocurrencia.



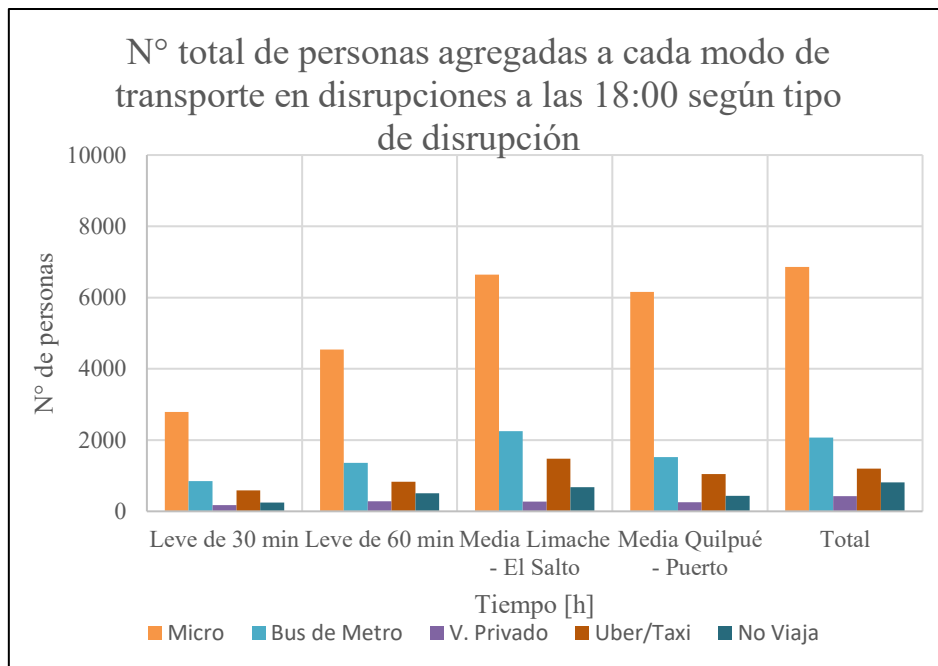
Anexo N°3: Gráfico de número de personas agregadas a cada modo de transporte en disrupciones tipo leve de 30 min según el horario de ocurrencia.



Anexo N°4: Gráfico de número de personas agregadas a cada modo de transporte en disrupciones tipo leve de 60 min según el horario de ocurrencia.



Anexo N°5: Gráfico de número de personas agregadas a cada modo de transporte en disrupciones a las 11:00 Salto según tipo de disrupción.



Anexo N°5: Gráfico de número de personas agregadas a cada modo de transporte en disrupciones a las 18:00 Salto según tipo de disrupción.