



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTIMACIÓN DE BENEFICIOS PARA SERVICIOS DE BUSES OPERADOS CON
ITINERARIOS

MEMORIA PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

HANS PETER STIER CELIS

PROFESOR GUÍA:

ALEJANDRO ANDRÉS TIRACHINI HERNÁNDEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ANTONIO GSCHWENDER KRAUSE

CRISTIÁN CORTÉS CARRILLO

SANTIAGO DE CHILE

2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: HANS PETER STIER CELIS
FECHA: JUNIO 2019
PROFESOR GUÍA: SR. ALEJANDRO TIRACHINI HERNÁNDEZ

ESTIMACIÓN DE BENEFICIOS PARA SERVICIOS DE BUSES OPERADOS CON ITINERARIOS

La misión del transporte público urbano es darle una solución eficaz y expedita a la necesidad de movilidad de las personas dentro de la ciudad. Las personas además de pagar el valor de la tarifa, por hacer uso del sistema de transporte, deben utilizar su tiempo (acceso, espera y viaje), incrementando el costo que perciben por usar el transporte público. Por esto, es necesario hacer un diseño táctico y operacional eficiente, buscando reducir, no solo los costos de operación, sino también el tiempo empleado por el usuario.

Los sistemas de buses poseen 2 formas de operación. Por frecuencia, cuando se asigna una oferta fija de buses por hora para operar un servicio y por itinerarios, cuando se fijan los horarios de pasada de buses en los paraderos. Esto ha sido abordado múltiples veces en la literatura, en donde se ha encontrado que para servicios de baja demanda es más eficiente una operación mediante itinerarios.

En el presente trabajo de investigación han sido estudiados los factores que inciden en el costo de los operadores y usuarios para 31 servicios de baja demanda del sistema de transporte público de Santiago de Chile, Transantiago. Se plantea un modelo microeconómico que considera costos de operadores y usuarios para determinar la frecuencia óptima de operación que minimice el costo total de una línea de bus simple. El modelo se aplica para un escenario con demanda paramétrica, considerando un promedio de la demanda en periodos fuera de punta.

El modelo tiene como objetivo principal determinar la variación de costos totales entre servir una línea de buses en modo itinerario o frecuencia, identificando qué variables y en qué medida afectan los costos según la forma de operación. Para esto, se crean distintos escenarios que determinan la influencia que tiene el hacinamiento, la variabilidad en la operación, el tiempo de programación de llegada al paradero y el nivel de conocimiento de los usuarios.

Para ello, fueron utilizados datos correspondientes a la semana laboral del 9 al 13 de abril de 2018, los cuales contienen información asociada a la operación de los buses en ruta y a la demanda que posee cada servicio. Además, existen datos de la operación del sistema, provista por el Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM). A su vez, se realizaron encuestas de preferencias reveladas, con el fin de entender el comportamiento de la gente ante los servicios operados con itinerarios.

Los resultados del modelo indican que para una operación óptima con itinerarios, se genera una reducción de 24% en los costos de espera del usuario. Por otra parte, se observó que en un escenario donde las personas conocen el itinerario y programan su llegada al paradero de forma eficiente, se alcanzan los mayores beneficios para una operación con itinerarios, generando una reducción de un 11% en los costos de espera de los usuarios. Además, considerar los efectos del hacinamiento y la variabilidad del servicio es importante para estimar correctamente los costos percibidos por ellos. Por lo tanto, informar activamente a los usuarios es fundamental para reducir tanto los costos de operación, debido a la menor frecuencia requerida, como los costos que percibe el usuario, ya que una operación con itinerarios le permite programar su viaje y utilizar de mejor forma su tiempo.

*“Intenta no volverte un hombre de éxito, sino
volverte un hombre de valor.”.*

Albert Einstein.

Agradecimientos

Quiero agradecer a las dos personas que hicieron posible este logro, mis padres. Me han mostrado su apoyo incondicional, desde los primeros pasos en la Escuela de Ingeniería. Me enseñaron la constancia y esfuerzo que se requiere para alcanzar las metas que nos proponíamos. Gracias por estar en todas las etapas que he vivido, siempre alentándome a ser una mejor persona.

Antonia, gracias por acompañarme en el final de este camino universitario, por las risas y la comprensión, eres la persona que llegó a llenar mi vida de alegrías. Gracias por los lindos momentos y el amor que me muestras en cada una de tus actitudes.

Juan Pablo, Santiago, Sebastián y los Fashions, les agradezco los increíbles momentos que vivimos, como los recreos de los lunes y las salidas espontáneas. Compartiendo penas y glorias en nuestro paso por esta casa de estudios. Espero que al final del día, todas las fichas de dominó hayan caído.

Camila, José, Sara, Ian, Sebastián, Clemente y a la sección 4, gracias por los buenos momentos a lo largo de estos años. Por su apoyo y compañía desde que entramos como mechones a nuestra querida sección, gracias por las experiencias y locuras que vivimos juntos.

A mis compañeros y amigos de Civil, con especial afecto a mis Transportistas favoritas, por su amistad sincera, su alegría, por compartir horas de estudio y buenos momentos, su cariño y por hacer de esta experiencia una de las más especiales.

Mis agradecimientos, al profesor Alejandro Tirachini, por haberme guiado en el camino final, por compartir conmigo sus conocimientos, por orientarme, por atender siempre mis dudas y buscar soluciones, por dedicarme su tiempo, su buena disposición y su confianza en mí.

A la vez, mi reconocimiento al profesor Antonio Gschwender, por su ayuda e interés para el desarrollo y revisión de mi trabajo, por estar siempre disponible cuando lo necesité y dispuesto a darme una mano.

Finalmente, quisiera agradecer a Felipe y Jaqueline, por su apoyo y ayuda incondicional siempre que los busqué, mucho éxito en sus desafíos futuros y en el desarrollo de Transapp.

Tabla de Contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Motivación.....	1
1.2.	El sistema de transporte público en Santiago de Chile.....	2
1.3.	Objetivos.....	5
1.3.1.	Objetivo general.....	5
1.3.2.	Objetivos específicos.....	5
1.3.3.	Estructura.....	6
2.	Revisión Bibliográfica.....	7
2.1.	Modelo de un periodo con demanda paramétrica.....	7
2.2.	Estudios sobre itinerarios de buses.....	11
2.3.	Variabilidad de intervalos y confiabilidad de servicio.....	12
3.	Modelo matemático.....	14
3.1.	Costos de operadores.....	14
3.1.1.	Costo de capital.....	14
3.1.2.	Costo de tripulación.....	15
3.1.3.	Costo de operación.....	15
3.1.4.	Otros costos.....	15
3.2.	Costos de usuarios.....	16
3.2.1.	Costo del tiempo de viaje.....	16
3.2.2.	Costo del hacinamiento.....	17
3.2.3.	Costo del tiempo de espera.....	18
3.2.4.	Ajuste del tiempo de programación.....	18
3.3.	Modelación.....	19
3.3.1.	Supuestos del modelo.....	19
3.3.2.	Parámetros del modelo.....	20
3.3.3.	Resumen del modelo.....	21
4.	Obtención y generación de datos.....	22
4.1.	Descripción de los periodos y servicios estudiados.....	22
4.1.1.	Periodos.....	22
4.1.2.	Servicios.....	23
4.2.	Generación de datos.....	24
4.2.1.	Demanda de pasajeros.....	25
4.2.2.	Porcentaje de evasión de pago.....	26

4.2.3.	Intervalo entre buses consecutivos y cálculo del coeficiente de variación.....	26
4.2.4.	Frecuencia de buses programada.....	30
4.2.5.	Largo de ruta.....	30
4.2.6.	Largo de viaje.....	30
4.2.7.	Velocidad comercial.....	31
4.2.8.	Resultados encontrados.....	31
4.3.	Toma de datos en terreno: Encuestas para diferentes servicios operados con itinerarios	33
4.3.1.	Enfoque para toma de datos.....	33
4.3.2.	Encuesta Piloto.....	34
4.3.3.	Tamaño muestral.....	36
4.3.4.	Estructura.....	36
4.3.5.	Encuesta presencial.....	37
4.3.6.	Encuesta online.....	42
4.3.7.	Resultados encontrados.....	44
5.	Resultados y Análisis.....	45
5.1.	Optimización del modelo: Caso base.....	45
5.1.1.	Optimización del modelo vigente.....	45
5.1.2.	Optimización del modelo con demanda amplificada.....	47
5.1.3.	Optimización del modelo para un escenario ideal.....	49
5.2.	Análisis de sensibilidad de las variables en estudio.....	51
5.2.1.	Efecto de un Pv sensible al hacinamiento.....	51
5.2.2.	Efecto de un TW sensible al intervalo.....	54
5.2.3.	Efecto de una operación irregular.....	56
5.2.4.	Efecto de una variación en el nivel de conocimiento.....	58
5.2.5.	Efecto de una variación en el tiempo de programación.....	60
5.3.	Resumen optimización escenario actual de operación.....	61
6.	Conclusiones y recomendaciones.....	63
6.1.	Conclusiones.....	63
6.2.	Limitaciones del trabajo y líneas futuras de investigación.....	66
	Bibliografía.....	67
	Anexo A.....	70
	Anexo B.....	73
	Anexo C.....	75
	Anexo D.....	78
	Anexo E.....	81

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Operadores de Transantiago.....	3
Tabla 3.1. Parámetros según tipo de bus.....	14
Tabla 4.1 Servicios en estudio.....	24
Tabla 4.2. Tabla campos espera laboral.....	27
Tabla 4.3. Variación de regularidad en intervalos, abril 2017 vs abril 2018.....	29
Tabla 4.4. Datos generados para servicios en estudio.....	32
Tabla 4.5. Ubicación paraderos, encuesta piloto.....	34
Tabla 4.6. Catastro, encuesta piloto.....	34
Tabla 4.7. Ubicación paraderos, encuesta presencial.....	37
Tabla 4.8. Tiempo de programación y espera, encuesta presencial.....	41
Tabla 4.9. Datos encuestados para servicios en estudio.....	44
Tabla 5.1. Resultados para el Caso A.....	46
Tabla 5.2. Intervalos calculados para el Caso A.....	47
Tabla 5.3 Intervalos y demanda calculada para el Caso B.....	48
Tabla 5.4 Resultados para el Caso B.....	49
Tabla 5.5. Resultados para el Caso C.....	49
Tabla 5.6. Intervalos calculados para el Caso C.....	50
Tabla 5.7. Resultados para el caso sensible al hacinamiento.....	52
Tabla 5.8. Intervalos calculados para el caso sensible al hacinamiento.....	52
Tabla 5.9. Valores de Pv encontrados para el caso sensible al hacinamiento.....	53
Tabla 5.10. Resultados para el caso sensible al intervalo.....	54
Tabla 5.11. Tiempos de programación observados para el caso sensible al intervalo.....	55
Tabla 5.12. Resultados para el caso sensible a la regularidad de operación.....	56
Tabla 5.13. Intervalos calculados para el caso sensible a la regularidad de operación.....	57
Tabla 5.14. Parámetros promedio de servicios en estudio.....	58
Tabla 5.15. Comparación de costos en escenario óptimo.....	61
Tabla 5.16. Intervalos calculados en escenario óptimo.....	62

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1.1. Índice de Cumplimiento de Regularidad, según cada operador.	4
Ilustración 1.2. Índice de Cumplimiento de Regularidad Según Puntualidad, según cada operador.	5
Ilustración 3.1. Valor del tiempo de viaje.	17
Ilustración 3.2. Ajuste del tiempo de programación.....	19
Ilustración 4.1. Evasión de pago, segundo trimestre de 2018.	26
Ilustración 4.2. Nivel de conocimiento operación modo itinerario, encuesta piloto.	35
Ilustración 4.3. Paradero encuestado servicio J06.	37
Ilustración 4.4. Distribución muestral, encuesta presencial.	38
Ilustración 4.5. Horario uso en día laboral, encuesta presencial.	39
Ilustración 4.6. Nivel de conocimiento de operación con itinerarios, encuesta presencial.	39
Ilustración 4.7. Nivel de conocimiento del itinerario, encuesta presencial.	40
Ilustración 4.8. Nivel de conocimiento agregado de operación con itinerarios, encuesta online..	42
Ilustración 4.9. Nivel de conocimiento agregado de operación, encuesta online.....	43
Ilustración 5.1. Costo de operadores y usuarios a distintos niveles de conocimiento, para un tiempo de programación de 4 minutos.	58
Ilustración 5.2. Costo de operadores y usuarios a distintos niveles de conocimiento, para un tiempo de programación de 6 minutos.	59
Ilustración 5.3. Costo de operadores y usuarios a distintos niveles de conocimiento, para un tiempo de programación de 8 minutos.	59
Ilustración 5.4. Costo de operadores y usuarios a distintos tiempos de programación.	60

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Motivación

El transporte público urbano tiene como objetivo darle una solución eficaz y expedita a la necesidad de movilidad de las personas dentro de la ciudad. En particular, los buses son una parte importante del sistema de transporte urbano, ya que, en comparación con los modos de transporte privado (bicicletas, motos, autos) logran aprovechar de mejor manera el espacio vial disponible. Además, tienen una menor tasa de emisión de contaminantes por pax-km y un costo marginal por viaje menor para altas tasas de ocupación, haciéndolos una forma más eficiente de transporte.

Este tipo de sistemas tienen un gran costo para el estado, ya que para que funcionen correctamente es necesario disponer continuamente de subsidios en infraestructura y operación.

Los sistemas de buses poseen 2 formas de operación. Por frecuencia, cuando se asigna una oferta fija de buses por hora para operar un servicio y por itinerarios, cuando se fijan los horarios de pasada de buses en los paraderos.

Una manera de mejorar la eficiencia del sistema es mediante la programación de los servicios, la cual describe el proceso de asignación de buses, fijando las expediciones que realiza a un itinerario. En otras palabras, se define el horario de llegada de los buses en todas las paradas, con diferentes objetivos: satisfacer patrones de demanda específicos, maximizar el número de transferencia de pasajeros, minimizar el tiempo de espera de los usuarios y reducir el exceso de oferta con el fin de disminuir los costos para el operador.

Así también, más allá de diseñar una planificación que permita lo anterior, los usuarios deberían tener los instrumentos necesarios para lograr programar su viaje con antelación. Conocer con qué servicios cuentan, cuánto tiempo les tomara su viaje y qué implica la ruta elegida por ellos. Esto implica una mayor exigencia para la incorporación de tecnologías al sistema de transportes, con el fin de garantizar un servicio con un estándar mínimo.

Mantener un servicio confiable y de calidad es vital para los diferentes actores del sistema. Una manera de caracterizar la calidad de servicio entregada a los usuarios es mediante el análisis de atributos como tiempo de viaje, tiempo de espera, regularidad y frecuencia. La confiabilidad se define como la invariabilidad en las causas que inciden en las decisiones de operadores y usuarios (Abkowitz, 1978). Es un factor importante para los diferentes agentes del sistema de transporte, debido a que, por una parte, se relaciona con el nivel de certeza que poseen los pasajeros en el tiempo que les tomara su viaje. Por otra, la confiabilidad también influye en los operadores, ya que sistemas más confiables logran captar una mayor cantidad de usuarios (Diab et al., 2015), mejorando la eficiencia y reduciendo los costos de él.

Durante la operación, los servicios de buses se ven afectados por diversos factores, los cuales empeoran la calidad del servicio y con ello, la experiencia de viaje del usuario. Uno de estos es la

regularidad de los intervalos entre expediciones consecutivas, cuando la operación es por frecuencia, la cual afecta la confiabilidad y el tiempo de espera en paradero de los usuarios. Una variabilidad muy alta en los intervalos deja en evidencia un fenómeno conocido como apelotonamiento, donde los buses de un mismo servicio se juntan a causa de la irregularidad existente (Arriagada,2016; Durán, 2016; Moreira-Matías et al,2012). Mientras mayor sea la variabilidad de los intervalos para una frecuencia dada, los usuarios observarán en promedio una mayor espera. Esto genera una reducción sobre la demanda del transporte público (Peek y Van Hagen, 2002). Por lo tanto, si se desea reducir el tiempo de espera, se pueden implementar soluciones como aumentar la frecuencia o bien, mejorar la confiabilidad (Bowman y Turnquist, 1981).








Si utilizamos una mirada microeconómica del sistema de transporte urbano, debemos tener en consideración dos tipos de costos: los que afectan al operador y los que le competen al usuario. Los primeros, se refieren a la flota, el combustible, las mantenciones, los costos administrativos y los choferes. Los segundos, se relacionan con el tiempo que emplean los usuarios para realizar su viaje, en este, a su vez, se consideran tres variables, el tiempo de acceso, el tiempo de espera en el paradero y el tiempo de viaje en ruta. Mohring (1972, 1976) y Jansson (1980) desarrollan varios modelos para la minimización en función de la frecuencia de operación, los cuales son luego extendidos incorporando diferentes efectos como el hacinamiento (Jara-Díaz y Gschwender, 2013) y la llegada de pasajeros al paradero dependiendo de la frecuencia de operación (Tirachini et al., 2010).

Esto abre una línea interesante de investigación, en torno a la posibilidad de mejorar la eficiencia y confiabilidad del sistema. Para esto, se deben fijar los horarios de pasada de los buses por los paraderos en los servicios de baja frecuencia, para entregar un servicio más regular y reducir los costos para los operadores y usuarios del sistema.

1.2. El sistema de transporte público en Santiago de Chile

Desde el año 2007 el sistema de transporte público en Santiago de Chile, Transantiago, considera la integración física y tarifaria de los principales medios de transporte en la ciudad. Por un lado, están la totalidad de buses del transporte público urbano, que son operados por concesionarios privados presentados en la Tabla 1.1, válida para el año 2018, y por otro, el Metro de Santiago, y desde el 2017, el Metrotrén Nos, operados por sus respectivas empresas del Estado. Estos tres modos están integrados tarifariamente, a través de un medio de acceso electrónico conocido como tarjeta Bip.

Tabla 1.1. Operadores de Transantiago.

Operador	Unidad de Negocio y Servicios
 Inversiones Alsacia S.A.	Unidad de Negocio 1 y responsable de los servicios 100 .
 Subus Chile S.A.	Unidad de Negocio 2 y responsable de los servicios 200 y G .
 Buses Vule S.A.	Unidad de Negocio 3 y responsable de los servicios 300, E, H e I .
 Express de Santiago Uno S.A.	Unidad de Negocio 4 y responsable de los servicios 400 y D .
 Metbus S.A.	Unidad de Negocio 5 y responsable de los servicios 500 y J .
 Redbus Urbano S.A.	Unidad de Negocio 6 y responsable de los servicios B y C .
 Servicio de Transporte de Personas S.A.	Unidad de Negocio 7 y responsable de los servicios F .

Fuente: DTPM, 2018.

La entidad encargada de gestionar, regular y coordinar el transporte público de la ciudad es el Directorio Transporte Público Metropolitano (DTPM). Este fue creado el 2012, con el propósito de vigilar la correcta operación y generar un plan para los distintos recorridos, indicando el trazado, las paradas asignadas, los despachos por período, entre otras características.

El sistema de buses de Transantiago cubre alrededor de 6,2 millones de usuarios de las 32 comunas que forman parte de Santiago, más Puente Alto y San Bernardo, en un área geográfica de alrededor de 680 km² en zonas urbanas. En un día laboral, se efectúan alrededor de tres millones de transacciones en buses de Transantiago.

Existen alrededor de 380 servicios diferentes, y aproximadamente 6700 buses circulando diariamente, estos buses de Transantiago poseen un sistema de posicionamiento GPS, entregando su localización cada 30 segundos. Además, gracias al sistema de pago electrónico, es posible observar datos sobre las transacciones realizadas en los distintos servicios, con esta información es posible caracterizar la demanda a la que es enfrentado el sistema a lo largo de sus recorridos.

Para poder calificar el desempeño operacional que poseen los distintos operadores, existen diferentes indicadores que pueden determinar la calidad de servicio entregada y la experiencia de viaje de los usuarios. Los indicadores utilizados son: Índice de Capacidad de Transporte (ICT), Índice de Calidad de Atención al usuario (ICA), Índice de Calidad de los Vehículos (ICV), Índice de Cumplimiento de Frecuencia (ICF) e Índice de Cumplimiento de Regularidad (ICR) (Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, 2012). Si estos indicadores se encuentran bajo ciertos umbrales de cumplimiento, las empresas pueden sufrir descuentos en su remuneración y/o multas. Por su parte, los incumplimientos reiterados y sistemáticos en los niveles de calidad de servicio se castigan en mayor medida que aquellos eventos aislados.

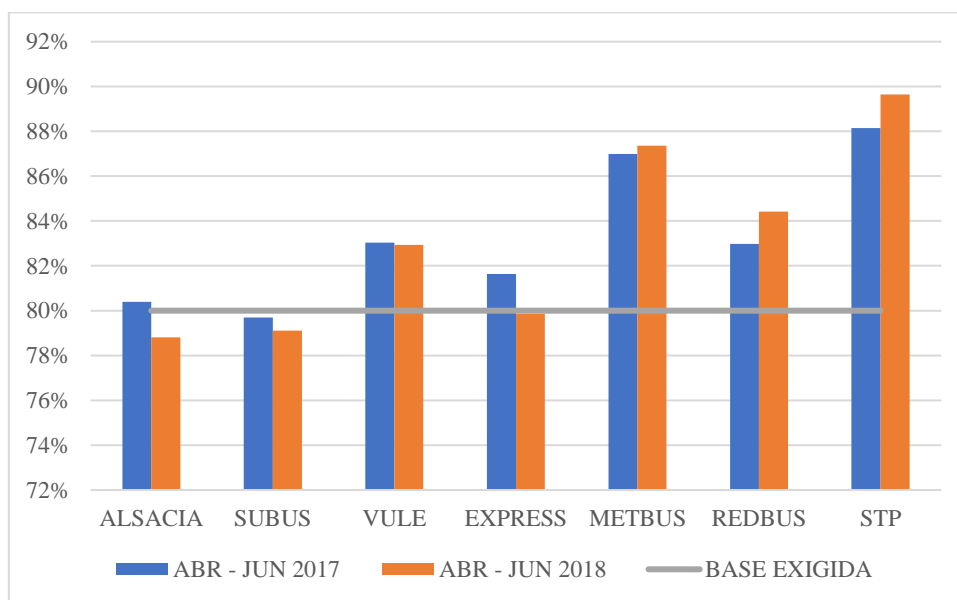
En particular, el ICR se obtiene comparando los intervalos entre buses operados por frecuencia de cada servicio y su desviación respecto a los intervalos programados. El propósito del ICR es monitorear que los usuarios no vean afectados sus tiempos de espera debido a un aumento en los intervalos entre buses o impuntualidad de los servicios. Este indicador, se calcula sobre la base del total de expediciones realizadas, y se mide la ubicación de los buses en tres puntos de la ruta, utilizando la información de los dispositivos de posicionamiento global GPS. La base exigida para este indicador es de un 80%. En la Ilustración 1.1 se muestra el cumplimiento del ICR, para el periodo comprendido entre abril y junio de los años 2017 y 2018, según cada operador.

Actualmente, se ofrecen 37 servicios con itinerario, de los cuales 16 operan durante el día y 21 en horario nocturno. De los servicios que operan durante el día, la mayoría de ellos no cuenta con itinerario en los períodos Punta Mañana ni Punta Tarde. Además, algunos de ellos presentan itinerario sólo en día laboral o los fines de semana. Estos servicios no se informan activamente al usuario, ya que actualmente se encuentran en fase de implementación, por lo que el conocimiento sobre la medida no supera un 15% por parte de los usuarios, de acuerdo al documento técnico provisto por Transantiago (DTPM, 2018).

Otro indicador interesante de analizar es el Índice de Cumplimiento de Regularidad según Puntualidad en ruta (ICR-P), para servicios operados por itinerarios, presentado en la Ilustración 1.2, el cual determina el desempeño de los servicios de baja demanda, analizando si cumplen con el umbral propuesto. Según los contratos de prestación de servicios actuales, se considera que un servicio basado en itinerario cumple con los horarios si el bus pasa por un paradero dentro de un intervalo entre 2 minutos de adelantamiento y 4 minutos de atraso, con respecto al tiempo programado de pasada.

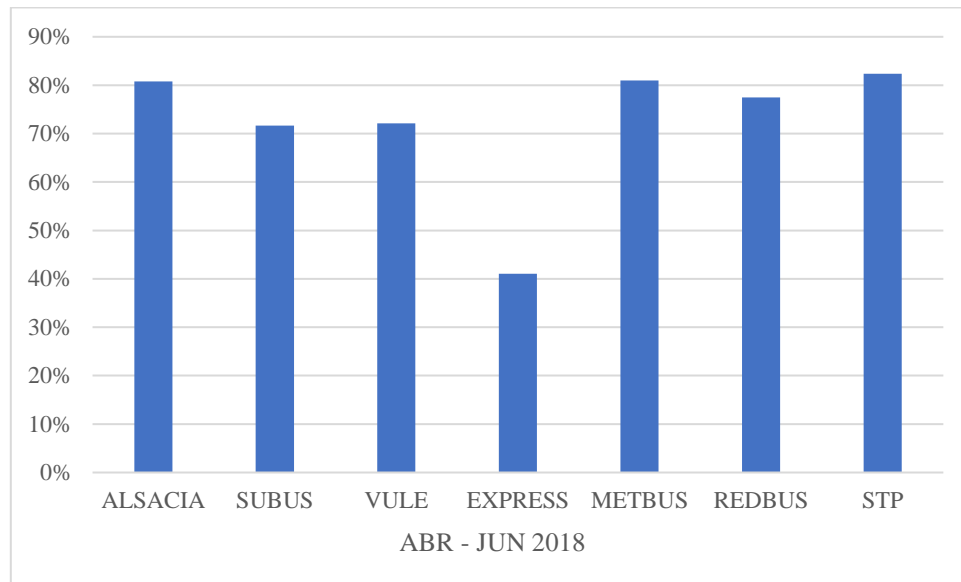
Analizando estos dos índices se puede concluir que existen operadores que poseen un buen cumplimiento, como lo son Metbus y Redbus, mientras que otros como Subus tienen una operación deficiente respecto a lo esperado por DTPM.

Ilustración 1.1. Índice de Cumplimiento de Regularidad, según cada operador.



Fuente: DTPM, 2018.

Ilustración 1.2. Índice de Cumplimiento de Regularidad Según Puntualidad, según cada operador.



Fuente: DTPM, 2018.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El presente trabajo tiene como objetivo principal determinar la variación de costos totales entre servir una línea de buses en modo itinerario o en modo frecuencia, identificando qué variables y en qué medida afectan a los costos según la forma de operación. Para ello, se desarrollará un modelo matemático, el cual se evaluará usando datos de conteo de pasajeros, posicionamiento de vehículos basado en GPS, el programa de operaciones propuesto por DTPM, y comportamiento del usuario caracterizado a través de encuestas, en distintos recorridos para la ciudad de Santiago de Chile.

1.3.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos del trabajo en que se desglosan los objetivos anteriores son:

- I. Identificar los atributos que serán considerados para modelar el problema. Poniendo atención a las investigaciones realizadas por diferentes autores en la materia y a los objetivos propuestos para el trabajo.

- II. Definir las variables de decisión que conformarán el modelo, la forma de la función objetivo, condiciones de aplicación y restricciones que se utilizarán.
- III. Recoger y procesar los datos necesarios para la aplicación del modelo al sistema de transporte público de Santiago, Transantiago. Estos datos se obtendrán a partir de las transacciones realizadas con las tarjetas electrónicas con que se pagan los pasajes en el sistema y de los GPS localizados en cada uno de los buses. Además, se realizará una encuesta de preferencias reveladas para entender el comportamiento de los usuarios ante servicios operados con itinerarios. Con estos datos es posible calcular los costos definidos en la modelación.
- IV. Resolver y optimizar el modelo aplicado a Transantiago, para identificar en qué circunstancias es óptimo operar basado en itinerario en lugar de basado en frecuencia.
- V. Realizar un análisis de sensibilidad de los resultados, así como un análisis comparativo entre esquemas de operación, para estimar los beneficios que se pueden obtener de ajustar el diseño actual de los itinerarios del sistema a los obtenidos a partir de la modelación.

1.3.3. Estructura

La estructura de la memoria se organiza de la siguiente manera. En primer lugar, se desarrolla, en el presente Capítulo, una motivación sobre el tema de estudio y una contextualización acerca del sistema de transporte público en Santiago de Chile.

En el Capítulo 2 se realiza una revisión bibliográfica enfocada en el desarrollo del marco teórico y descripción del estado del arte de los aspectos relacionados con la investigación sobre operación de buses con itinerarios.

En el Capítulo 3 se detalla la modelación, es decir, las principales variables utilizadas, que explican el valor de los recursos consumidos.

El Capítulo 4 se enfoca en la metodología realizada para recopilar los datos que se utilizan para la estimación de los costos totales del sistema.

En el Capítulo 5 se encuentran los resultados obtenidos de la modelación y se desarrolla un análisis de sensibilidad sobre los parámetros más relevantes del problema, lo cual permite definir las variables explicativas que mayormente afectan en los costos totales.

Por último, en el Capítulo 6 se sintetizan las conclusiones encontradas tras el desarrollo del trabajo, implicancias y se proponen futuras líneas de investigación.

Capítulo 2

2. Revisión Bibliográfica

En los últimos años, se han estado realizando investigaciones para desarrollar modelos de optimización que, por un lado, mejoren la conveniencia del servicio para el pasajero, y por otro, haga más eficiente la gestión de buses. En el presente capítulo, se caracterizarán los estudios relevantes sobre modelos de itinerarios de buses que buscan determinar una solución óptima para este problema.

Para realizar este estudio, en primer lugar, se expone el modelo propuesto, considerando un solo periodo de estudio, para conocer la metodología que se ocupará al realizar la comparación de costos. Luego, se presentan los trabajos en materia de itinerario de buses, entendiendo las diferentes visiones para afrontar este problema.

Finalmente, se presenta el problema de la variabilidad de los intervalos de tiempo entre expediciones consecutivas a lo largo de la ruta, con el fin de comprender cómo se caracteriza y cómo afecta esta variabilidad en la calidad percibida por el usuario.

2.1. Modelo de un periodo con demanda paramétrica.

En la literatura existen múltiples modelos microeconómicos que buscan optimizar la operación de una línea de buses. Varios modelos consideran una línea aislada y un solo periodo de estudio, típicamente el periodo con mayor demanda. El pionero en desarrollar estos trabajos fue Mohring (1972, 1976), donde utilizando los principios propuestos por Vickrey (1955), desarrolla un modelo, Ecuación 2.1, que logra explicar el valor de los recursos consumidos (VRC) por hora, considerando el costo por parte de los operadores y usuarios.

$$VRC = Bc + P_v t_v Y + P_w t_w Y + P_a t_a Y \quad (2.1)$$

En esta ecuación se considera un tamaño de flota (B), con un costo de operación (c) por vehículo-hora. Una demanda paramétrica (Y) de pasajeros por hora, con t_v , t_w y t_a , siendo el tiempo promedio de viaje en vehículo, tiempo de espera en la parada y tiempo de acceso al paradero, respectivamente. Además, P_v , P_w y P_a son los valores del tiempo para viaje, espera y acceso, respectivamente.

El tiempo de ciclo t_c se asume constante en este modelo y se relaciona con el tamaño de flota mediante la Ecuación 2.2.

$$B = f t_c \quad (2.2)$$

Luego, reemplazando (2) en (1), asumiendo que el tiempo de espera promedio es la mitad del intervalo del servicio ($t_w = 1/2f$) y tiempos de viaje y acceso t_v y t_a constantes, se llega a la Ecuación 2.3, donde el VRC queda expresado solamente por la frecuencia.

$$VRC = f t_c c + P_v t_v Y + P_w \frac{1}{2f} Y + P_a t_a Y \quad (2.3)$$

Aplicando condiciones de primer orden, se llega a que la frecuencia óptima queda expresada según la Ecuación 2.4 (Mohring, 1972).

$$f^* = \sqrt{\frac{P_w Y}{2 t_c c}} \quad (2.4)$$

Este término es conocido como “la regla de la raíz cuadrada”, donde se observa que la frecuencia varía proporcionalmente a la raíz cuadrada de la demanda. Sin embargo, el modelo presenta algunas limitaciones, ya que considera un tiempo de ciclo y de viaje independientes de la frecuencia. Estas consideraciones son razonables si el tiempo de viaje no dependiera de los tiempos de detención en paradero, pero ante escenarios con variación de demanda en paraderos, es importante incluir el efecto de la demanda, en el tiempo de detención. Por esto, Jansson (1980, 1984) extiende el modelo de Mohring (1972, 1976), considerando que el tiempo de ciclo depende de la cantidad de subidas y bajadas por paradero, dejando expresado el tiempo de ciclo según la Ecuación 2.5.

$$t_c = T + t \frac{Y}{f} \quad (2.5)$$

En esta ecuación, T es el tiempo del bus en recorrer un ciclo, considerando una velocidad que incluye las interacciones con otros vehículos y los tiempos de posicionamiento en paradero, mientras que el segundo término representa el tiempo de subida y bajada de pasajeros en paraderos.

Por otra parte, se define l como la longitud del viaje promedio por pasajero y L como el largo de la ruta, luego el tiempo de viaje promedio se puede escribir en función del tiempo de ciclo según la Ecuación 2.6.

$$t_v = t_c \frac{l}{L} \quad (2.6)$$

En este modelo, el tiempo de acceso es constante, debido a que el diseño de la ruta y los paraderos no son considerados como variables a optimizar, por lo tanto, el término del costo de

acceso no se considera dentro de la función de VRC. Reemplazando estas expresiones en la Ecuación 2.3, obtenemos la Ecuación 2.7.

$$VRC(f) = f t_c(f) c + P_v t_c(f) \frac{l}{L} Y + P_w \frac{1}{2f} Y \quad (2.7)$$

De la misma forma, aplicando condiciones de primer orden llegamos a que la frecuencia óptima se define según la Ecuación 2.8.

$$f^* = \sqrt{\frac{Y}{cT} \left(\frac{P_w}{2} + P_v t_c Y \frac{l}{L} \right)} \quad (2.8)$$

Esta expresión representa una versión modificada de la “regla de la raíz cuadrada”. Se observa el mismo efecto, donde la frecuencia óptima incrementa proporcionalmente a la raíz cuadrada de la demanda para el caso en que el segundo término del paréntesis es insignificante en relación con el primero, pero en caso contrario, la frecuencia varía proporcionalmente a la demanda.

Es importante notar una limitación de este modelo, ya que supone condiciones homogéneas para la demanda (Y) y tiempo de ciclo (T), las cuales varían incluso durante un mismo día de operación.

El promedio de pasajeros en cada bus (k) en el modelo se define según la Ecuación 2.9, este valor debe cumplir la condición de ser menor que la capacidad máxima del bus utilizado para computar los costos.

$$k = \frac{Yl}{fL} \quad (2.9)$$

La optimización de una línea aislada ha sido tratada desde otros puntos de vista. Krauss (1991) extendió este modelo, considerando el efecto que causa el hacinamiento en los pasajeros, el cual se refleja en un aumento del valor de tiempo de viaje. Él consideró una línea de buses que opera entre el centro de la ciudad y la periferia, estudiando el comportamiento y cuantificando el efecto del aumento del valor de tiempo de viaje para usuarios que van de pie en el servicio. Concluye, que existe un aumento en el valor del tiempo en vehículo que el usuario percibe cuando el bus no dispone de asientos libres.

En la literatura se ha encontrado que un alto nivel de hacinamiento en buses aumenta la disposición a pagar de los pasajeros para disminuir su tiempo de viaje (Wardman y Whelan, 2011; Tirachini et al., 2013), por este motivo, es importante introducir el efecto al modelo, y así capturar completamente el costo de viaje que impone el sistema a los usuarios. Finalmente, Batarce (2015) mediante encuestas de preferencias declaradas estima el valor del tiempo de viaje para diferentes niveles de ocupación en Santiago de Chile.

Jara-Díaz y Gschwender (2003) introducen el efecto del hacinamiento en un nuevo modelo para optimizar frecuencia y capacidad de buses. En un principio, se utilizó una forma lineal para expresar este efecto, según la Ecuación 2.10.

$$P_v(\emptyset) = P_{v_0} + P_{v_1}(\emptyset) \quad (2.10)$$

Phi (\emptyset) representa el nivel de ocupación de bus, como la razón entre los pasajeros a bordo y la capacidad máxima (K).

$$\emptyset = \frac{k(f)}{K} \quad (2.11)$$

Posteriormente, Whelan y Crockett (2009) realizaron un estudio de preferencias declaradas, estimando mediante diferentes funciones (lineal por tramos, potencia, exponencial, Gompertz) el valor del tiempo de viaje en función de la tasa de ocupación de un tren, tanto para pasajeros sentados como de pie. Concluyeron que funciones más complejas no generan resultados más significativos, por lo que una aproximación lineal por tramos es la forma más simple e intuitiva de representar el costo de la alta ocupación en los usuarios.

Debido a la naturaleza del presente estudio, el enfoque microeconómico representado en los modelos anteriores se extiende respecto al tiempo de espera del usuario, donde captura el comportamiento del usuario en dos casos: cuando el usuario conoce el itinerario de pasadas y programa su llegada, o cuando el usuario no conoce el itinerario y llega al paradero aleatoriamente.

Tirachini et al. (2010) analiza la llegada de pasajeros al paradero dependiendo de la frecuencia de operación del servicio. Servicios que operen a 5 buses/hora o menos son considerados como de baja demanda, en donde los usuarios llegan según el itinerario del recorrido. Existe un tiempo de espera fuera del paradero producto de que las horas de pasada del bus no son a la hora deseada por el usuario, llamada demora por itinerario (“scheduling delay”), esta penalización es más grande mientras mayor sea el intervalo entre buses. Como este tiempo “pasivo” de espera puede ser usado en casa o algún lugar donde el usuario pueda darle a su tiempo un mejor uso, el costo de oportunidad o ahorro de tiempo de espera pasivo (P_h), es menor que el valor del tiempo de espera en el paradero (P_w). Luego, el tiempo de espera promedio queda representada según la Ecuación 2.12 (Tirachini et al., 2010).

$$t_w = P_w(t_p + \mu \frac{\xi}{f}) \quad (2.12)$$

μ es la razón del tiempo de espera pasivo (P_h) y tiempo de espera activo (P_w), t_p es un umbral de seguridad fijo de llegada al paradero, tiempo usado a la espera del siguiente bus.

De esta manera, se procede a definir el modelo, de acuerdo a las variables de decisión descritas, para la modelación del problema de estimar los costos totales para los servicios que se estudiarán.

2.2. Estudios sobre itinerarios de buses

La programación de buses es un paso importante dentro de la planificación del transporte público. Esta, describe el proceso de asignación de buses, fijando las expediciones que realiza a un itinerario. En otras palabras, se define el horario de llegada de los buses en todas las paradas, con diferentes objetivos: satisfacer patrones de demanda específicos, maximizar el número de transferencia de pasajeros, minimizar el tiempo de espera de los usuarios y reducir el exceso de oferta con el fin de disminuir los costos para el operador.

El estudio se enfocará en la literatura que busca minimizar el tiempo de espera de los usuarios. Los primeros trabajos con este enfoque fueron sugeridos por Newell (1971), Salzborn (1972) y Hurdle (1973), formulando el problema para una sola ruta, con el objetivo de minimizar este tiempo. Estos resultados sugieren que la tasa óptima a la que se despachan los vehículos es proporcional a la raíz cuadrada de la tasa de llegada de pasajeros, con la restricción de que la capacidad del vehículo no puede ser superado, llegando a la misma conclusión vista en los trabajos de Mohring (1972, 1976).

Bowman (1981) desarrolla un modelo para evaluar la sensibilidad del tiempo esperado de espera respecto a la frecuencia del servicio y confiabilidad horaria. En este modelo utiliza datos del área de Chicago, donde incorpora explícitamente un proceso de toma de decisiones de los usuarios que, en lugar de asumir llegadas al azar, llegan de forma programada al paradero. Así, llega a la conclusión de que el tiempo de espera del pasajero es más sensible a la confiabilidad de la programación y mucho menos a la frecuencia del servicio.

Luego Ceder (1984, 1986), trabaja principalmente en encontrar la frecuencia óptima de servicio mediante diferentes métodos, con el fin de cumplir dos objetivos: El ajuste de las frecuencias de bus para mantener una calidad de servicio adecuada y minimizar el número de autobuses en el periodo; a través de la asignación eficiente de los recursos acorde a los datos de carga de pasajeros. Llegando a la conclusión que, para un caso con intervalos iguales de salida, los usuarios naturalmente se distribuyen, logrando una ocupación igualmente distribuida para los diferentes buses que sirven la línea.

En suma, un itinerario de servicio que busca ser rentable y eficiente implica un compromiso entre los costos de usuarios y operadores. Un buen ajuste entre la oferta de buses y la demanda de pasajeros ocurre cuando los itinerarios se construyen de manera que la demanda observada de pasajeros es servida, mientras se minimiza el costo de operadores y usuarios.

Este enfoque logra minimizar el costo total de operación, en términos del costo de la tripulación, costo de capital, costo de operación de buses, costo del tiempo de viaje y espera del usuario. Este concepto de rentabilidad y eficiencia lleva a definir 3 objetivos al momento de establecer un itinerario:

- I. Evaluar diferentes itinerarios en términos de los costos que presentan.
- II. Mejorar la relación de los tiempos de salida de los buses con respecto a la demanda de pasajeros, reflejada en una minimización de los costos totales de operación.
- III. Permitir, en el procedimiento de construcción del itinerario, cambios directos en la frecuencia de los buses para posibles excepciones (conocidas por el planificador) que no se basan en la información de la demanda, con el fin de entregar la calidad esperada.

2.3. Variabilidad de intervalos y confiabilidad de servicio

La variabilidad en los intervalos se ha estudiado extensamente, producto de los problemas que ocasiona en los servicios y cómo ella impacta negativamente en la calidad percibida por el usuario. El intervalo de buses corresponde al tiempo entre dos expediciones consecutivas que pertenecen a un mismo servicio. Debido a diferentes circunstancias que se presentan en ruta, o en el despacho, se genera una diferencia respecto al intervalo programado, esto origina variabilidad en los intervalos del servicio y, en consecuencia, un deterioro de la calidad. El-Geneidy et al. (2011) comenta que al mantener una regularidad en los intervalos y un tiempo de viaje constante se ofrece un servicio confiable. Mostrando la relación estrecha entre regularidad y confiabilidad de servicio.

Strathman et al. (2001) clasifica las causas de estos problemas en internos y externos al sistema. Los problemas internos se refieren a la demora en los despachos, el comportamiento del operador y la variabilidad de la demanda, entre otros. Mientras que las causas externas se provocan por condiciones de operación, como la demora en intersecciones y la congestión, entre otros. Strathman (2003) también atribuye estos problemas a atributos del servicio, como el largo de la ruta o la cantidad de paraderos, entre otros.

Una variabilidad muy alta en los intervalos deja en evidencia un fenómeno conocido como apelotonamiento, donde los buses de un mismo servicio se juntan a causa de la irregularidad existente. Diferentes trabajos (Arriagada, 2016; Durán, 2016; Moreira-Matías et al. 2012) comentan los factores más importantes que generan una irregularidad en la operación, estos se detallan a continuación:

- *Condiciones de operación en ruta:* Congestión, cantidad de intersecciones semaforizadas y los tiempos de programación de ellas, aumentan la ocurrencia de intervalos irregulares, producto de que no permiten un tránsito a flujo libre (condición ideal).
- *Infraestructura en ruta:* Existencia de vías exclusivas y corredores segregados, donde el bus posee la prioridad de circulación, generan una menor cantidad de incidentes en ruta en comparación a buses que circulen en vías de tráfico mixto. Por lo tanto, medidas que mejoren la infraestructura del transporte público conllevan a una menor variabilidad en los intervalos.
- *Frecuencia programada:* A una mayor frecuencia de operación, aumenta la probabilidad de intervalos irregulares, por lo que una operación con itinerarios (reducción de frecuencias) reducirá los apelotonamientos en ruta. Sin embargo, al reducir la frecuencia genera un aumento en el tiempo de espera de los usuarios.

- *Largo de la ruta:* En rutas más largas los buses se ven enfrentados a mayores factores que empeoran el intervalo de operación. Entonces, mientras más alejados se encuentren los buses del cabezal de inicio, mayor será la irregularidad observada.
- *Demanda del servicio:* La demanda del servicio afecta directamente en el tiempo de viaje de los usuarios. A una mayor demanda, el tiempo de detención en paraderos aumenta, causando irregularidad en el intervalo programado. La disminución en la frecuencia programa de operación tiene por consecuencia este problema, debido a que menos buses sirven la misma demanda, el tiempo de subida y bajada en paraderos aumentará. Entonces, debido a la variabilidad de la demanda y frecuencia de operación, la irregularidad observada aumentará.
- *Regularidad en los despachos:* Una mayor irregularidad en los despachos de buses al inicio de la ruta provoca una mayor ocurrencia de apelotonamiento de buses. Por consiguiente, mientras más regular sean los despachos se observarán intervalos más regulares.
- *Paraderos en ruta:* Servicios que sirvan una mayor cantidad de paraderos aumenta significativamente la variabilidad en los intervalos. Esto provoca un aumento del número de detenciones, generando una reducción en la velocidad comercial observada y una mayor irregularidad en comparación a servicios que sirven una menor cantidad de paraderos.

Estos factores provocan una irregularidad en los intervalos observados y a su vez, son los causales de variabilidad en el tiempo de viaje y espera del usuario. Además, producto de la incertidumbre de los tiempos percibidos por el usuario, se afecta directamente la calidad y confiabilidad que percibe.

Godachevich (2017) menciona que el tiempo de espera percibido por el usuario impacta sobre la calidad percibida, por lo que algunas medidas que se toman en cuenta para reducir el tiempo de espera son: aumentar la frecuencia de operación, lo que genera una disminución en el intervalo de buses y, por ende, una reducción en los tiempos de espera de los usuarios que lleguen aleatoriamente al paradero. Por otra parte, una reducción en la variabilidad de los intervalos genera una mayor confiabilidad por parte del usuario hacia el sistema de transporte, provocando que el usuario programe su hora de llegada al paradero para servicios operados con itinerarios.

En su investigación Moreira-Matías et al. (2012) concluye que las siguientes consecuencias son provocadas por una alta variabilidad en los intervalos: buses a capacidad, demoras adicionales, menor comodidad de viaje, aumento de tiempos de espera, mayor costo de operación y disminución de la confiabilidad de horarios. Esto conlleva a una reducción en la calidad percibida y a una fuga de pasajeros del sistema.

En servicios que operan de acuerdo a un itinerario, la irregularidad en los intervalos ocasiona que un bus recoja tanto a pasajeros que esperan por él, como a aquellos que llegaron anticipadamente a esperar el siguiente bus. Esto resulta en un mayor número de subidas y bajadas en cada paradero, aumentando el tiempo de detención y afectando los tiempos de viaje y espera del usuario. Luego, para estos servicios es importante mantener la puntualidad en su operación.

Concluyendo, se observa que la variabilidad de intervalos en el sistema afecta tanto al operador (aumento en costos de operación), como en el usuario (aumento en tiempos de viaje). Esto impacta en la confiabilidad percibida, reduciendo la valoración de los usuarios al sistema, y a su vez, genera una disminución en la proporción de usuarios que programa su viaje.

Capítulo 3

3. Modelo matemático

En el siguiente capítulo se describe la metodología de cálculo del modelo microeconómico utilizado. Con el fin de computar los costos de operación de los servicios en estudio, se detallarán las variables utilizadas, definiendo los supuestos utilizados y se detallará la metodología utilizada para el cálculo del escenario base y de los diferentes casos de comparación.

3.1. Costos de operadores

Los costos asociados a los operadores son la primera parte para considerar dentro del modelo microeconómico, éstos se dividen en 4 componentes: el costo de capital, el costo de los conductores, el costo operacional y el costo de administración, como porcentaje del costo total de operación. Estos costos serán descritos de acuerdo a Espinoza (2017) y se presentan en la Tabla 3.1. Los costos de los operadores se detallan a continuación.

Tabla 3.1. Parámetros según tipo de bus.

Tipo de Bus	Costo de Capital [\$/bus-día]	Costo de Tripulación [\$/h]	Costo Operacional [\$/bus-km]	Capacidad [plazas/bus]
8 m	\$ 15.302	\$ 4.622	\$ 206	50
10 m	\$ 21.423	\$ 4.622	\$ 265	60
12 m	\$ 33.664	\$ 4.622	\$ 308	90

Fuente: Espinoza, 2017.

3.1.1. Costo de capital

El costo de capital determina el costo que implica el tamaño de la flota para el operador. De acuerdo a lo visto en el Capítulo 2, se define la flota necesaria por servicio (B_i) como la multiplicación de la frecuencia (f_i) por el tiempo de ciclo (t_c) (Ecuación 2.2). En el modelo se considerará una flota de reserva (η).

Luego, el costo de capital (C_{cap}) se calcula como el costo diario de un bus (C_0) (Tabla 3.1) por la flota requerida para operar el servicio, según la Ecuación 3.1.

$$C_{cap_i} = C_0 \eta f_i t_{c_i} \quad (3.1)$$

3.1.2. Costo de tripulación

El costo de la tripulación determina el costo que implican los conductores dentro de la operación de los servicios. Asumiremos que es necesario un conductor para cada bus, por lo tanto, se puede definir el número de conductores necesario como el tamaño de la flota requerida (Ecuación 2.2). Luego, considerando una hora-conductor (C_1) (Tabla 3.1), el costo de tripulación (C_{trip}) se define como el costo por hora de todos los conductores de un servicio por la duración todos los periodos en estudio (D), según la Ecuación 3.2.

$$C_{trip_i} = C_1 f_i t_{c_i} D \quad (3.2)$$

3.1.3. Costo de operación

El costo operacional se relaciona directamente con los kilómetros recorridos por los buses. Éste se compone de todos los gastos que genera la distancia recorrida por la flota, como son: combustible y aditivos, lubricantes, repuestos, neumáticos, baterías, definidos en el estudio de DTPM (2013).

Luego, estimando un costo operacional (C_2) (Tabla 3.1) y calculando la velocidad V comercial de cada servicio (Capítulo 4), se determina el costo operacional (C_{op}) de cada servicio se define según la Ecuación 3.3:

$$C_{op_i} = C_2 V c_i f_i t_{c_i} \quad (3.3)$$

3.1.4. Otros costos

La estructura de costos de un operador no solo se compone de los gastos antes descritos, también existen aquellos asociados a administración, arriendos y seguros.

Espinoza (2017), basado en ATC (2006), construye un cuarto costo como porcentaje del costo operacional (φ). Definiendo diferentes escenarios de demanda, calibra y determina que proporción se asemeja de mejor manera a la estructura promedio de un operador de Transantiago, reportada en DTPM (2013).

De acuerdo a lo estimado en Espinoza (2017), se utiliza una proporción (φ) de 44%, es decir, los costos de administración se incorporan al modelo incrementando en un 44% los costos operacionales.

3.2. Costos de usuarios

Los costos asociados a los usuarios son la segunda parte para considerar dentro del modelo microeconómico. Estos se dividen en 2 componentes: el costo asociado al tiempo de viaje y al tiempo de espera.

Dentro del costo asociado al tiempo de viaje, se considerará el efecto que produce el hacinamiento de bus. Mientras que en costo asociado al tiempo de espera se incluirá el efecto del tiempo de programación. Estos alcances se detallan a continuación.

Cabe destacar que no se considerará el tiempo de acceso en el modelo microeconómico, esto debido a que el espaciamiento entre paraderos no varía, por lo que no es una variable por optimizar en el modelo.

3.2.1. Costo del tiempo de viaje

El costo del tiempo de viaje de los usuarios (C_v) se calcula como el tiempo total de viaje (t_v) por el valor del tiempo de viaje (P_v), el cual depende del nivel de hacinamiento del servicio (θ) según se explica en la Sección 2.1.

Como se mencionó en el Capítulo 2, el tiempo total de viaje del usuario se determina mediante el tiempo de ciclo (t_v), por la razón de viaje promedio del usuario (Ecuación 2.6). Además, el tiempo de ciclo depende del tiempo de cruce del servicio y el tiempo de detención en paraderos (Ecuación 2.5).

Luego, el costo total del tiempo de viaje de los usuarios para un servicio i , con un nivel de demanda Y , queda definido por la Ecuación 3.4:

$$C_{vi} = Y_i P_{vi}(\theta) \frac{l_i}{L_i} (R_i + \beta \frac{Y_i}{f_i}) \quad (3.4)$$

Donde β corresponde al tiempo promedio de subidas de los usuarios, este valor ha sido estimado para Santiago en Tirachini et al. (2015) para diferentes condiciones de operación, estimándose que los usuarios, en un bus con 2 puertas para un paradero normal, demoran en abordar 2,4 segundos. Cabe destacar que los autores concluyen que el tiempo promedio de subida es independiente del número de puertas producto de que las subidas, en el caso de un paradero normal, se concentran solo en la puerta delantera.

3.2.2. Costo del hacinamiento

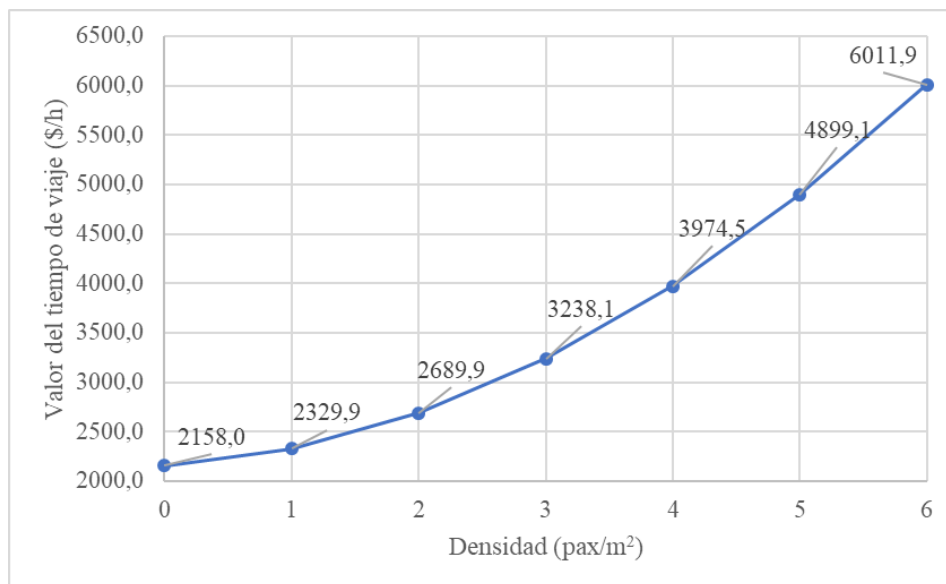
El costo de viaje que el usuario percibe depende de las características del viaje. En diferentes trabajos (Whelan y Crockett (2009), Wardman y Whelan (2011), Tirachini et al. (2013) se ha visto que un alto nivel de hacinamiento en estaciones y buses aumentan la disposición a pagar de los usuarios por disminuir su tiempo de viaje.

El escenario base busca comprender la totalidad del costo que el sistema impone a los usuarios, por lo que es importante agregar esta variable en la modelación.

Batarce et al. (2015), a través de encuestas de preferencias declaradas y reveladas, realiza una estimación del valor de tiempo de viaje para diferentes densidades de pasajeros en Santiago de Chile. En ella utiliza una función lineal por tramos discontinua. Luego, Espinoza (2017) realiza un ajuste a una función cuadrática según la Ecuación 3.5, obteniendo valores del tiempo en vehículo para diferentes niveles de hacinamiento según la Ilustración 3.1.

$$P_V(\theta) = 2.158 + 77,77 \theta + 94,09 \theta^2 \quad (3.5)$$

Ilustración 3.1. Valor del tiempo de viaje.



Fuente: Espinoza (2017).

Para estimar la densidad promedio de cada servicio, en primer lugar, es necesario calcular la carga del bus, que corresponde al promedio de pasajeros (k) que lleva cada tipo de bus de capacidad (K), presentada en la Tabla 3.1. El promedio de pasajeros se determina mediante la Ecuación 2.9, utilizando los datos de la demanda calculados en el Capítulo 4.

Luego, la densidad (θ) queda definida según la Ecuación 3.6.:

$$\theta = \frac{k * 6}{K} \quad (3.6)$$

3.2.3. Costo del tiempo de espera

El costo del tiempo de espera de los usuarios (C_w) se calcula como el valor del tiempo de espera (P_w) por el tiempo total de espera. Este último se compone por dos partes: usuarios que programan su hora de llegada al paradero según el itinerario (*proporción* α) y usuarios que no conocen el itinerario, los cuales llegan aleatoriamente al paradero (proporción $1 - \alpha$).

Además, se considera que todos los usuarios se suben al primer bus que llega al paradero (debido a que se impone una restricción de capacidad en el modelo). En el caso de los buses se considera que para aquellos servicios que operen de acuerdo a una frecuencia establecida llegarán a los paraderos con una distribución Poisson, mientras que aquellos que operen según un itinerario llegan siempre dentro del umbral de puntualidad.

Esto último, es cierto debido a que en casos donde el bus se atrase o adelante respecto de su hora establecida de pasada, el usuario está internalizando la irregularidad de las llegadas y él ajusta su tiempo de programación (t_p), umbral de seguridad de llegada al paradero, de acuerdo a la confiabilidad en el servicio.

Luego, el costo total del tiempo de espera de los usuarios para un servicio i , con un nivel de demanda Y , queda definido por la Ecuación 3.7:

$$C_{wi} = P_w * Y_i * \left\{ \alpha_i * \left[t_{pi} + \frac{\mu * \mathcal{E}_i}{2 * f_i} \right] + (1 - \alpha_i) * \frac{\mathcal{E}_i}{2 * f_i} \right\} \quad (3.7)$$

Donde μ es la razón entre el valor del tiempo de espera pasivo (fuera del paradero) y el valor del tiempo de espera activo (en el paradero), según lo visto en la Sección 2.1, utilizando un ajuste de 1/3 propuesto en Tirachini et al. (2010).

3.2.4. Ajuste del tiempo de programación

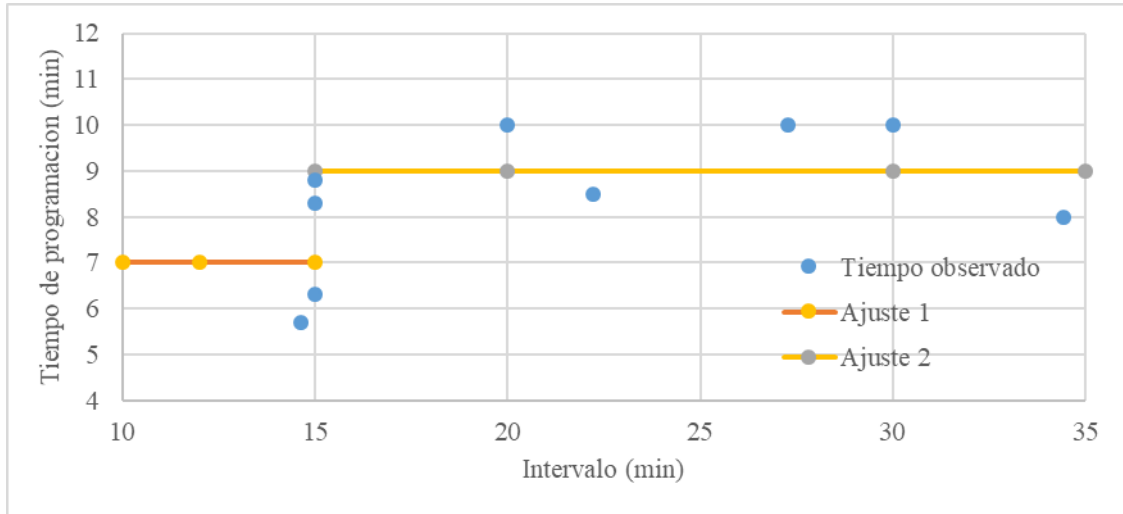
Los usuarios que conocen el itinerario de pasada del servicio programan su llegada al paradero, este tiempo fue estimado mediante encuestas de preferencias reveladas (Capítulo 4).

El presente trabajo busca relacionar el tiempo de programación observado con el intervalo de pasada del servicio, para esto, utilizando los datos obtenidos en 9 servicios (Tabla 4.8) se realiza una aproximación por tramos. En ella, se estima que para servicios que operen con un intervalo (I) menor o igual a 15 minutos los usuarios programan su llegada con 7 minutos de anticipación en promedio, mientras que para intervalos mayores se programan con 9 minutos de anticipación en promedio (Ecuación 3.8).

$$t_{pi} = \begin{cases} 7 \text{ min}, & I \leq 15 \text{ min} \\ 9 \text{ min}, & I > 15 \text{ min} \end{cases} \quad (3.8)$$

En la Ilustración 3.2 se presenta los tiempos de programación observados para los 9 servicios encuestados.

Ilustración 3.2. Ajuste del tiempo de programación.



Fuente: Elaboración propia.

3.3. Modelación

Los supuestos considerados para la modelación, así como los parámetros y el modelo matemático utilizado para la optimización del problema de costos totales se detallan a continuación.

3.3.1. Supuestos del modelo

Los supuestos utilizados en la modelación matemática son los siguientes:

- I. Todos los pasajeros que se encuentren esperando para abordar un bus lo podrán hacer por decisión del modelador. Es decir, siempre es posible que aborde la totalidad de los pasajeros esperando.
- II. Para servicios que actualmente operan con itinerarios, los buses circulan en base a los itinerarios previstos que incluyen tiempos de viaje y parada conocidos (incluidos en el tiempo de ciclo). Más específicamente, la existencia o no de pasajeros que quieran subir o bajar del bus en una parada determinada no altera el cumplimiento de los itinerarios previstos.

- III. El costo operacional que enfrentan los operadores de cada servicio se relaciona linealmente con el número de buses necesarios para prestar el servicio y la duración del periodo en estudio. Los costos unitarios incurridos en la operación están previamente establecidos y son independientes de las variables de optimización.
- IV. La demanda de cada servicio es independiente del nivel de servicio que se entregue, esta es calculada previamente a la optimización.

3.3.2. Parámetros del modelo

Para la formulación del modelo matemático se consideraron los siguientes parámetros:

C_0	:	Costo de flota del operador en \$/bus-día.
C_1	:	Costo de hora-conductor del operador en \$/h.
C_2	:	Costo operacional del operador en \$/km.
φ	:	Otros costos de operación.
η	:	Flota de reserva.
Y	:	Demanda media por servicio en Pax/h.
β	:	Tiempo de subida por pasajero en horas.
V	:	Velocidad comercial del bus en km/h.
R	:	Tiempo en ruta del servicio en horas.
f	:	Frecuencia del servicio en bus/h.
l	:	Largo de viaje promedio del usuario en kilómetros.
L_i	:	Largo de ruta ida en kilómetros.
L_r	:	Largo de ruta retorno en kilómetros.
μ	:	Razón del valor del tiempo de espera en el hogar.
t_p	:	Tiempo de programación del usuario en horas.
α	:	Nivel de conocimiento del itinerario.
\mathcal{E}	:	Variabilidad del intervalo de operación.
D	:	Duración del periodo en estudio en horas.
P_v	:	Valor del tiempo de viaje en \$/Pax.
P_w	:	Valor del tiempo de espera en \$/Pax.

Definido lo anterior, el costo total del servicio i queda expresado por la Ecuación 3.9.

$$C_{tot_i} = C_0 \eta f_i t_{c_i} + C_1 f_i t_{c_i} D + C_2 V c_i f_i t_{c_i} (1 + \varphi) + Y_i P_{v_i}(\Theta) \frac{l_i}{L_i} \left(R_i + \beta \frac{Y_i}{f_i} \right) \quad (3.9)$$

$$+ P_w * Y_i * \left\{ \alpha_i * \left[t_{p_i} + \frac{\mu * \mathcal{E}_i}{2 * f_i} \right] + (1 - \alpha_i) * \frac{\mathcal{E}_i}{2 * f_i} \right\}$$

3.3.3. Resumen del modelo

Para estimar el modelo se utilizaron dos restricciones. La primera de ellas acota la frecuencia para cada servicio i según la Ecuación 3.10. La frecuencia mínima se fija en 2 buses/hora de acuerdo a una política de calidad mínima de servicio, mientras que la frecuencia máxima se fija en 6 buses/hora debido a que estamos estudiando servicios de baja demanda que operan con itinerarios con un intervalo mínimo de 10 minutos.

$$f_{min} \geq f_i \geq f_{max} \quad (3.10)$$

La segunda restricción acota la frecuencia mínima, asegurando que todos los usuarios se suban al primer bus que llega al paradero y este no supere su capacidad máxima K (Ecuación 3.11).

$$f_{min} = \frac{\sigma * Y}{v * K} \quad (3.11)$$

Donde σ representa a la proporción de usuarios que viaja en la sección más cargada (Tabla 4.4) y v representa el factor de seguridad para absorber variaciones en la demanda, fijado en 0.9.

De esta manera, el modelo matemático se establece de la siguiente manera:

$$\text{Min}_f \quad C_{tot} = C_{cap} + C_{trip} + C_{op}(1 + \varphi) + C_v + C_w$$

$$\text{s. a} \quad f_{min} \geq f_i \geq f_{max}$$

$$f_{min} = \frac{\sigma * Y}{v * K}$$

El problema de optimización se resuelve utilizando el programa matemático MATLAB R2013a, utilizando la función *fincan* en conjunto con el algoritmo de optimización *interior-point*.

Lo anterior, resuelve utilizando como punto inicial la frecuencia actual de operación (Tabla 4.4). Además, se utilizaron los parámetros de tolerancia predefinidos en el enfoque propuesto por *GlobalSearch*, presentados en el manual del programa¹.

El código utilizado se presenta en el anexo A.

¹ <https://www.mathworks.com/help/gads/how-globalsearch-and-multistart-work.html> (Accedido el 03/03/2019).

Capítulo 4

4. Obtención y generación de datos

Los datos utilizados para el trabajo son pertenecientes al sistema de transporte público de Santiago, Transantiago. Estos fueron obtenidos a través del sistema de posicionamiento de vehículos (GPS), transacciones de pago (AFC), programa de operación y encuestas realizadas a usuarios del sistema.

Los buses pertenecientes a Transantiago poseen dispositivos GPS, sistema que recopila información de todos los vehículos, registrando tiempo y posición cada 30 segundos (Cortes et al., 2011). Además, se registran todas las transacciones validadas a través del sistema tecnológico de recolección automática de tarifa basado en tarjetas inteligentes, permitiendo tener información útil sobre la demanda del servicio, los intervalos entre buses consecutivos que pasen por un mismo paradero y el largo promedio de viaje que realiza un usuario.

4.1. Descripción de los periodos y servicios estudiados

El trabajo se enfoca en analizar la factibilidad económica de operar servicios de buses de baja demanda mediante itinerarios. Para esto, se estudiará la variabilidad de los intervalos de tiempo entre buses consecutivos, la demanda promedio del servicio, el largo promedio del viaje realizado, entre otros factores relevantes para 5 periodos del día caracterizados por:

- *Periodos fuera de punta:* producto de la alta demanda de viajes que se genera en periodos punta, además de diferentes factores externos a la operación del servicio, solamente se considerarán periodos fuera de punta para el análisis de servicios basados en itinerario.
- *Periodos diurnos:* a causa de la dificultad para realizar toma de datos en periodos nocturnos, y la incertidumbre al estimar la evasión para corregir la demanda, se considerarán solamente periodos diurnos para el análisis.

4.1.1. Periodos

Los periodos en estudio se presentan a continuación. Los datos corresponden a la operación del sistema de buses en la semana laboral del 9 al 13 de abril de 2018:

- *Periodo 1: Transición punta mañana (TPMA)*, para este periodo se utilizaron los datos de los diferentes servicios en estudio, para la hora comprendida entre las 8:30 y las 9:29 horas.

- *Periodo 2: Fuera punta mañana (FPMA)*, para este periodo se utilizaron los datos de los diferentes servicios en estudio, para la hora comprendida entre las 9:30 y las 12:29 horas.
- *Periodo 3: Punta medio día (PMD)*, para este periodo se utilizaron los datos de los diferentes servicios en estudio, para la hora comprendida entre las 12:30 y las 13:59 horas.
- *Periodo 4: Fuera punta tarde (FPTA)*, para este periodo se utilizaron los datos de los diferentes servicios en estudio, para la hora comprendida entre las 14:00 y las 17:29 horas.
- *Periodo 5: Transición punta tarde (TPTA)*, para este periodo se utilizaron los datos de los diferentes servicios en estudio, para la hora comprendida entre las 20:30 y las 21:29 horas.

4.1.2. Servicios

Actualmente, en el Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM) se encuentra en fase de implementación el modo de operación con itinerarios, donde existen 37 servicios con itinerario, de los cuales 16 operan durante el día y 21 en horario nocturno.

Cabe destacar que los servicios que operan durante el día, la mayoría de ellos no cuenta con itinerario en los períodos Punta Mañana ni Punta Tarde. Además, algunos de ellos presentan itinerario sólo en día laboral o solo los fines de semana.

Con el fin de realizar el análisis de factibilidad, se consideraron servicios que, independiente de su modo de operación actual (Itinerario o Frecuencia), operen a una frecuencia máxima de 5 buses por hora. Todos los servicios que actualmente, operan con itinerarios en horario diurno cumplen con esta restricción, pero no se estudiarán los servicios J07, J07e y F06 a causa de inconsistencias en las bases de datos.

En la Tabla 4.1 se presentan los servicios que se analizaran en el presente trabajo, en ella se detalla el operador y la forma actual de operación. Los servicios J07, J07e y F06 aparecen en rojo producto de que en la base de datos poseen ciertos tramos con cargas negativas de pasajeros, por lo que no se trabajarán en el estudio.

Tabla 4.1 Servicios en estudio.

Frecuencia		Itinerario	
Operador	Código Servicio	Operador	Código Servicio
Vule	321	Subus	G02
Vule	350	Subus	G07
Vule	H02	Vule	H05c
Vule	H04	Vule	H12
Vule	H05	Metbus	J06
Vule	H09	Metbus	J07
Vule	H14	Metbus	J07e
Vule	I05	Metbus	J11
Redbus	B04v	Metbus	J17
Redbus	B10	Redbus	C08
Redbus	B11	Redbus	C12
Redbus	B15	Redbus	C13
Redbus	B17	Redbus	C17
Redbus	B19	Redbus	C19
Redbus	B23	STP	F03c
Redbus	B24	STP	F06
Redbus	B25		
Redbus	C04		

4.2. Generación de datos

En esta sección se detalla la metodología que se utilizó para la generación de los datos del presente trabajo. Todos los recorridos estudiados poseen dos sentidos, ida y retorno, por ello se definirá el término “servicio-sentido” para referirse a datos que posean observaciones para cada sentido.

Para realizar la generación de datos por cada servicio en estudio se utilizó la base de datos generada mediante el software ADATRAP a partir de metodologías desarrollada en conjunto por

la Universidad de Chile y el Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM), la cual fue recopilada gracias al sistema de pago Tarjeta Bip y de los GPS existentes, disponible en todos los buses del sistema.

Esta base de datos contiene información específica de cada servicio, correspondiente a la parada en donde se realiza la subida y bajada, la hora de pasada por cada paradero, la hora de inicio y término de la expedición, la patente del bus, la distancia en ruta, modo de viaje, distancia en ruta recorrida, entre otros.

Esta información permite calcular las variables presentadas en esta sección, para posteriormente calcular los costos totales de operación para cada servicio en estudio.

4.2.1. Demanda de pasajeros

Los usuarios haciendo uso de su tarjeta inteligente, validan su viaje al momento de subir al bus o entrar a la zona paga si existiera. Esto permite adquirir datos sobre la hora, día, lugar y bus en donde se efectuó la validación. Posteriormente, se realiza un cruce de información entre la validación realizada y el posicionamiento GPS del bus, obteniendo los datos correspondientes al número de subidas de pasajeros, por cada paradero y cada servicio en estudio. Esta información es procesada por el software ADATRAP y queda bajo la extensión “Identificador.Profile”, donde el Identificador corresponde al día, mes y año de los datos, mientras que Profile es una extensión del software.

Posteriormente, se realiza un filtro de los datos disponibles, correspondiente al periodo del día, donde se analizó la información comprendida para los periodos en estudio, descritos en la sección anterior. Con esto, se hace posible la obtención del total de subidas realizadas a cada servicio-sentido para los periodos de interés, en los cinco días en estudio. Cabe destacar que no existe información de viajes no registrados mediante la Tarjeta Bip (evasión de pago).

La demanda media por expedición del servicio (DM_i) se calcula mediante un promedio simple de la demanda media diaria (filtrada por los periodos en estudio), calculada a partir de la Ecuación 4.1.

$$DM_i = \frac{Sub_i}{t_i * f_{prog}} \quad (4.1)$$

La cual depende del total de subidas registradas para el día i (Sub_i), por servicio-sentido, el periodo en estudio (t_i), y la frecuencia programada (f_{prog}).

Se debe tener en consideración que la demanda calculada, a partir de las transacciones Bip, ha sido corregida por la evasión al pago del pasaje, promedio por operador, según lo informado por el Programa Nacional de Fiscalización. Con ello, se mide la demanda efectiva por servicio. Los resultados se resumen en la Tabla 4.4.

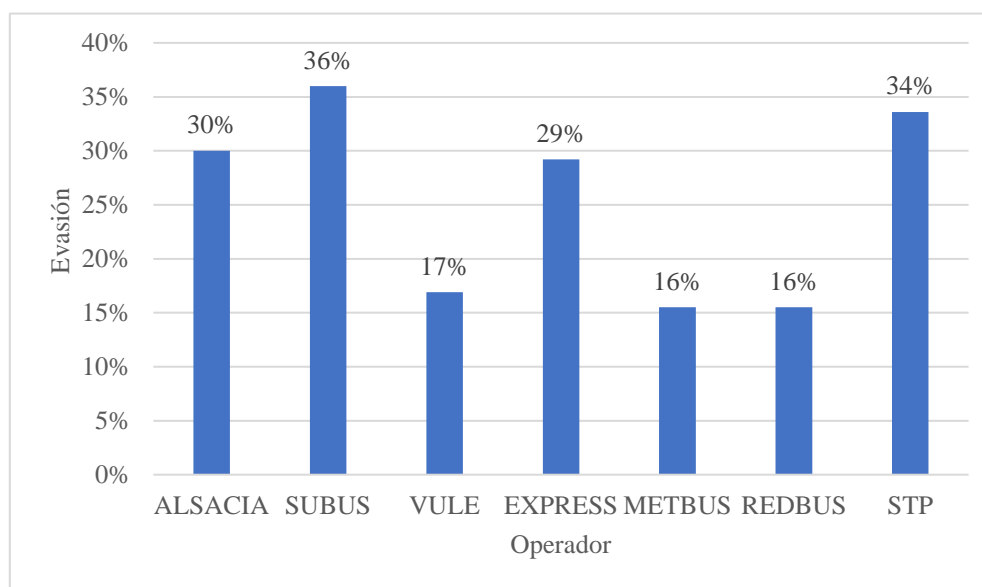
4.2.2. Porcentaje de evasión de pago

El Programa Nacional de Fiscalización ha estimado la evasión de pago por parte de los usuarios. Para su cálculo se realizaron mediciones en 62 servicios de las 7 unidades de negocios, durante la segunda y tercera semana de cada mes, entre los meses de abril y junio de 2018, durante el periodo comprendido entre las 6:30 y las 21:00 horas.

Se han realizado estimaciones trimestrales desde el año 2013, donde el primer semestre de 2018 se estimó una evasión del 28,5%, mientras que, para el segundo trimestre del mismo año, trimestre en estudio, se estimó un nivel global de evasión del 25,5%, con un error muestral del 0,6%. Esta información se encuentra disponible en el sitio web del Programa Nacional de Fiscalización².

En la Ilustración 4.1 se presenta el índice de evasión estimado para el trimestre en estudio, según cada operador, el cual se ha utilizado para ajustar la demanda media por servicio.

Ilustración 4.1. Evasión de pago, segundo trimestre de 2018.



Fuente: Programa Nacional de Fiscalización, 2018.

4.2.3. Intervalo entre buses consecutivos y cálculo del coeficiente de variación

El archivo “Identificador.Profile”, generado por el software ADATRAP, también posee registros para cada servicio-sentido de los instantes de pasada de cada bus por los paraderos que le corresponden al servicio, estos registros incluyen información específica del bus (patente, hora de inicio y de fin de la expedición) y del paradero (correlativo, código, nombre), lo que permite tener datos para cada expedición.

² <http://www.fiscalizacion.cl/indice-de-evasion-de-pago-de-tarifa-en-transantiago/> (Accedido el 03/03/2019).

Estos datos permiten identificar los instantes de pasada de todas las expediciones, por todos los paraderos del sistema, haciendo posible determinar la variabilidad de los intervalos para los servicios-sentido que se encuentran en estudio.

Para el análisis de los intervalos y el posterior cálculo del coeficiente de variación se codifica en el programa Python un código que permite leer las bases de datos, para luego determinar el intervalo promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación, generando como resultado un archivo Excel denominado “Espera Laboral.xlsx”, el cual contiene calculados para 2103 paraderos, de los 31 servicios en estudio. En la Tabla 4.2 se presentan los campos contenidos en el archivo generado, mientras que el código utilizado, del programa Python, se presenta en el anexo B.

Tabla 4.2. Tabla campos espera laboral.

Nombre	Descripción
Avg.	Intervalo promedio
Cv.	Coeficiente de variación
Desv.std.	Desviación estándar
Paradero	Código del paradero
Ruta	Código del servicio-sentido

El intervalo de tiempo entre dos expediciones se determina mediante el cálculo con los registros del archivo “Identificador.Profile”. Con el fin de obtener intervalos certeros, se aplicaron cuatro filtros, los cuales se clasifican de la siguiente forma:

- *Por periodo en estudio:* El archivo descrito se filtra según el periodo del día, sobreviviendo solamente las expediciones que tengan una hora de inicio dentro de los periodos en estudio descritos anteriormente.
- *Por intervalos observados grandes:* Se eliminaron los intervalos de tiempo que sean clasificados como un “intervalo afectado”. Donde un intervalo afectado es el cual cumple un intervalo observado mayor al doble tiempo aceptable (TA) del servicio-sentido, el cual se define de acuerdo al intervalo programado (h_{prog}) y la holgura establecida (H_{ol}), según la Ecuación 4.2.

$$h_{obs} > 2TA = 2(h_{prog} + H_{ol}) \quad (4.2)$$

Dentro de las posibles causas que originan intervalos mayores al aceptable puede atribuirse a las observaciones de los paraderos ubicados al inicio y fin de la expedición, o un problema con los pulsos GPS del sistema de buses.

- *Por paradero:* Se eliminan las observaciones de los primeros dos y últimos dos paraderos de cada servicio-sentido, este filtro se aplica con el objetivo de eliminar el ruido que genera en los datos producto de que los conductores son los encargados de dar el comienzo y el fin del servicio, donde se ha detectado un mal uso de la tecnología ya que generan inicios de servicio erróneos y luego de pasar por los primeros paraderos, ajustan el servicio al correcto.

- *Por ausencia de pulsos GPS:* Se eliminan las observaciones en las cuales las expediciones no registran un pulso GPS, esto se explica por problemas tecnológicos o desvíos de ruta. Esta eliminación se justifica producto del ruido que genera en los datos, aumentando injustificadamente el intervalo promedio del servicio-sentido.

En Arriagada (2016) se identifican tres causas que pueden generar una ausencia del pulso GPS en los buses del Transantiago, tomando en consideración que las expediciones en paraderos contiguos presentan tiempos de pasada:

- I. Problemas tecnológicos relacionados al GPS.
- II. Desvíos en la ruta que hacen que los buses no pasen por algunos paraderos del recorrido.
- III. Falla del bus que hace que este deje de funcionar y retome el camino con la ayuda de alguna grúa en algún punto de la ruta.

De estas causas, la única que genera un cambio directo en el intervalo de tiempo entre buses, es la falla del bus, puesto que el vehículo deja de pasar por los siguientes paraderos y por ende el intervalo de tiempo del bus que está detrás de este, aumenta.

Seguidamente, se corrigen los registros según los filtros mencionados anteriormente y se calcula el intervalo observado, en segundos, para cada servicio-sentido i , en todo paradero j como la diferencia entre el tiempo de pasada del bus k y el bus $k+1$ por dicho paradero, según la Ecuación 4.3.

$$h_{obs_{ijn}} = Tiempo_{ijk+1} - Tiempo_{ijk} \quad (4.3)$$

Luego, el intervalo promedio para cada paradero se calcula mediante el promedio simple de todos los intervalos observados N según la Ecuación 4.4.

$$\overline{h_{obs_{ij}}} = \frac{\sum_n h_{obs_{ijn}}}{N} \quad (4.4)$$

Posteriormente, se calcula la desviación estándar (s_{ij}) y el coeficiente de variación (Cv_{ij}), para todos los servicio-sentido i , en todos sus paraderos j que se encuentran en estudio según las Ecuaciones 4.5 y 4.6.

$$s_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_N (h_{obs_{ijn}} - \overline{h_{obs_{ij}}})^2}{N}} \quad (4.5)$$

$$Cv_{ij} = \frac{s_{ij}}{\overline{h_{obs_{ij}}}} \quad (4.6)$$

Finalmente, con la demanda de pasajeros por cada paradero, calculada anteriormente, se estima el intervalo promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación para cada servicio como el promedio, ponderado por la demanda de cada paradero, de todos los paraderos de dicho servicio. Los resultados se resumen en la Tabla 4.4.

Esta metodología se utilizó para realizar el cálculo en el periodo de estudio comprendido en la semana laboral del 9 al 13 de abril de 2018, además, se utilizó para calcular la semana laboral del 10 al 14 de abril de 2017 con el objetivo de comparar la regularidad de los intervalos según el modo de operación, para los servicios que operan con frecuencia de 5 buses/h o inferior.

Se destaca que todos los servicios que se encuentran en estudio no han cambiado su modo de operación del año 2017 al 2018, en la Tabla 4.3 se muestra la variación en la regularidad de los intervalos, según el modo de operación.

Tabla 4.3. Variación de regularidad en intervalos, abril 2017 vs abril 2018.

Modo de Operación	Variación Observada (%)
Itinerario	-5,56%
Frecuencia	1,62%

Fuente: Elaboración propia.

Se destaca que la variación observada para servicios operados con itinerarios es negativa, lo que significa que entre los años 2017 y 2018 los servicios con itinerarios mejoraron su regularidad de pasada en un 5,6% en promedio. Mientras que en los servicios operados en modo frecuencia se ve una disminución de un 1,6% en su regularidad de pasada.

Esto se puede deber a que los servicios operados con itinerarios se rigen según el Índice de Cumplimiento de Regularidad según Puntualidad (ICR-P), mientras que los servicios operados con frecuencia se rigen según el Índice de Cumplimiento de Regularidad (ICR). El primero, posee un mayor peso en la fórmula de pago que el segundo, esto conlleva a afirmar que operar un servicio itinerario de forma deficiente genera una multa mayor que operar un servicio de frecuencia. Esto explica la mayor preocupación por parte del operador al buscar mejorar la regularidad de los intervalos para este tipo de operación.

Otra explicación posible es que debido a la existencia de itinerario es más fácil para el conductor saber si está dentro del itinerario, y en caso de estar fuera de él, aplicar medidas de espera en paradero (adelantado respecto al itinerario) o aumentar la velocidad para regularizar el tiempo (atrasado respecto al itinerario). En cambio, para servicios basado en frecuencia, si el conductor desea mantener la regularidad del intervalo necesita información de los buses que lo suceden y lo anteceden, por lo que es más difícil regular su operación en ruta.

4.2.4. Frecuencia de buses programada

DTPM dispone de información histórica, referente al programa operacional de todos los servicios-sentido. Define diferentes parámetros de operación relevantes para el sistema, siendo uno de ellos la frecuencia programada del servicio (en bus/h), el cual se encuentra en el archivo “05. Consolidado Parámetros 2018-04-07.xlsx”, disponible en la página del DTPM³.

Este archivo posee información correspondiente a la fecha comprendida entre el 7 de abril y el 30 de junio de 2018, este documento puede ser filtrado según el periodo, tipo de día, servicio, sentido de operación, e incluso el operador. Para el trabajo se filtra la información relevante, que corresponde a los servicios-sentido en estudio, para los periodos de interés, para un día tipo laboral.

Finalmente, la frecuencia utilizada es el promedio simple, de los cinco periodos en estudio, de la frecuencia planificada por DTPM, los resultados se resumen en la Tabla 4.4.

4.2.5. Largo de ruta

Al igual que la frecuencia programada, el largo de ruta ha sido reportado por DTPM en el archivo “05. Consolidado Parámetros 2018-04-07.xlsx”, en él se encuentra la distancia promedio (en kilómetros) para cada servicio-sentido, validada hasta el 30 de junio de 2018.

Estos datos se filtran según cada servicio-sentido, los resultados se resumen en la Tabla 4.4.

4.2.6. Largo de viaje

El software ADATRAP genera otro tipo de archivo el cual contiene información del viaje del usuario dentro del sistema. El archivo que genera se denomina “Identificador.Etapas”, donde el Identificador corresponde al día, mes y año de los datos, mientras que Etapas es una extensión del software.

En este archivo se posee información específica del usuario como lo es el propósito estimado de su viaje, el modo en el que realiza la etapa, la hora de inicio y fin de la expedición, el servicio de bus de subida y bajada estimada, la hora de subida y bajada del servicio, la distancia recorrida de viaje, el identificador del usuario, entre otros. Para la estimación del destino del viaje, se utiliza la metodología descrita en Munizaga y Palma (2012).

Para calcular el largo de viaje promedio por servicio utilizamos la base de datos antes descrita, en ella se identifica el servicio de subida y bajada, la distancia recorrida por el usuario y la hora de inicio y fin de la expedición. La información se filtra de acuerdo al servicio de subida y bajada, para considerar solo servicios en estudio y según la hora de inicio y fin de la expedición, la cual debe coincidir con el periodo en estudio.

³ <https://www.dtpm.cl/> (Accedido el 03/03/2019).

Posteriormente, se calcula el largo de viaje (l_i) para cada servicio i como el promedio simple del largo de viaje realizado por cada usuario n (l_{in}), según la Ecuación 4.7.

$$l_i = \frac{\sum_n l_{in}}{N} \quad (4.7)$$

Los resultados se resumen en la Tabla 4.4.

4.2.7. Velocidad comercial

La velocidad comercial de un bus corresponde al promedio de la velocidad durante un ciclo en ruta, considerando todas las detenciones que realiza a lo largo de la ruta, por ejemplo, en paraderos, semáforos e intersecciones, lo que implica una demora adicional.

Para calcular la velocidad comercial se utilizó la base de datos detallada en la sección 4.2.3. En ella se entrega información de la hora de inicio y término de cada expedición. A partir de esta información se determina el tiempo de viaje de una expedición como la diferencia entre la hora de término y la hora de inicio de ella. Esto se calculó para todas las expediciones observadas dentro del periodo en estudio, para todos los servicios-sentido.

Luego, para determinar la velocidad comercial (Vc_i) por cada servicio i , se computa el cociente entre el largo de ruta (l_i) y el promedio de los tiempos de viaje de las expediciones (t_{in}) para todas las expediciones observadas (N_i) según la Ecuación 4.8.

$$Vc_i = \frac{l_i}{\frac{\sum_N t_{in}}{N_i}} = \frac{N_i * l_i}{\sum_N t_{in}} \quad (4.8)$$

El resultado obtenido corresponde a la velocidad comercial para cada servicio en estudio, usada para computar los costos totales de operación de cada uno. Esto fue estimado para la semana laboral del 9 al 13 de abril de 2018, los resultados se resumen en la Tabla 4.4.

4.2.8. Resultados encontrados

Concluyendo esta sección, en la Tabla 4.4 se presentan los datos generados para cada servicio en estudio. Estos datos fueron utilizados por el modelo matemático para calcular los costos totales de los servicios en estudio.

Tabla 4.4. Datos generados para servicios en estudio.

Servicio	Modo de Operación	Demanda Pasajeros [Pax/h]	Evasión de Pago [%]	Demanda Corregida [Pax/h]	Frecuencia Programada [Bus/h]	Largo de Ruta Ida [Km]	Largo de Ruta Retorno [Km]	Largo de Viaje [Km]	Velocidad Comercial [Km/h]	Coefficiente de Variación [-]	Usuarios en Sección más Cargada [%]
G02	Itinerario	109	36,00%	149	4	14,67	12,09	4,55	26	0,305	0,244
G07	Itinerario	161	36,00%	219	4	21,72	21,52	5,16	26	0,368	0,218
321	Frecuencia	160	16,90%	188	4,3	9,14	9,79	3,96	21	0,424	0,236
350	Frecuencia	190	16,90%	222	4,3	15,69	15,73	5,55	19	0,368	0,200
H02	Frecuencia	157	16,90%	184	4,4	7,04	6,7	2,35	16	0,34	0,088
H04	Frecuencia	143	16,90%	167	4,4	8	6,56	2,2	17	0,361	0,200
H05	Frecuencia	249	16,90%	291	4,3	9,88	10,07	3,16	17	0,354	0,405
H05c	Itinerario	70	16,90%	82	4	3,98	3,99	2,07	17	0,238	0,327
H09	Frecuencia	215	16,90%	252	4,3	10,26	9,99	2,94	17	0,352	0,236
H12	Itinerario	173	16,90%	202	4	16,22	16,15	5,1	20	0,289	0,214
H14	Frecuencia	163	16,90%	191	4,1	12,73	11,16	3,55	19	0,418	0,327
I05	Frecuencia	393	16,90%	459	4	19,24	18,15	4,43	17	0,45	0,343
J06	Itinerario	12	15,50%	13	1,7	9,59	8,31	2,73	20	0,12	0,318
J11	Itinerario	45	15,50%	52	2,7	14,15	15,65	10,89	42	0,304	0,432
J17	Itinerario	50	15,50%	58	2	9,12	7,87	3,05	28	0,102	0,250
B04v	Frecuencia	124	15,50%	143	4	9,72	8,85	3,01	18	0,422	0,000
B10	Frecuencia	291	15,50%	336	4,9	12,24	11,68	3,45	17	0,506	0,111
B11	Frecuencia	195	15,50%	225	4,3	17,86	18,09	3,77	19	0,472	0,366
B15	Frecuencia	107	15,50%	123	4,7	7,01	6,69	3,29	18	0,388	0,218
B17	Frecuencia	195	15,50%	225	4,9	9,78	10,38	2,1	19	0,514	0,453
B19	Frecuencia	228	15,50%	264	4,6	14,88	13,62	3,08	21	0,447	0,436
B23	Frecuencia	69	15,50%	80	4	5,63	8,15	3,21	18	0,449	0,394
B24	Frecuencia	154	15,50%	177	4,2	13,46	9	3,41	19	0,546	0,183
B25	Frecuencia	125	15,50%	145	4,1	8,28	7,9	2,78	18	0,534	0,280
C04	Frecuencia	191	15,50%	220	4	12,32	10,76	2,98	18	0,461	0,280
C08	Itinerario	101	15,50%	117	4,1	8,71	8,33	3,21	27	0,231	0,366
C12	Itinerario	116	15,50%	133	3,6	11,95	11,65	3,96	30	0,295	0,218
C13	Itinerario	31	15,50%	36	2,2	4,71	7,21	3	23	0,192	0,236
C17	Itinerario	56	15,50%	65	2	9,94	11,21	7,69	25	0,121	0,343
C19	Itinerario	49	15,50%	56	3	5,39	5,75	3,08	26	0,375	0,343
F03c	Itinerario	94	33,60%	125	3,1	8,49	8,29	3,38	19	0,255	0,360

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Toma de datos en terreno: Encuestas para diferentes servicios operados con itinerarios

Con el fin de estimar correctamente el costo de los usuarios en el sistema, es necesario observar decisiones tomadas por las personas en el contexto de interés, esto significa entender el comportamiento ante un servicio operado en modo itinerario. Para ello, existen dos formas principales para llevar esto a cabo: Preferencias declaradas (PD) y preferencias reveladas (PR).

Dada la naturaleza de lo que se estudia, se decidió realizar encuestas PR a diferentes servicios de interés. En primer lugar, se realizó una encuesta piloto para 5 servicios del sistema, con el fin de comprender la claridad de la encuesta y detectar falencias en ella. Posteriormente, se realizó la encuesta oficial para 9 servicios. Además, se realizó una encuesta Online que siguiera la misma estructura de la encuesta presencial a través de la aplicación Transapp. Las encuestas se realizaron con el objetivo de recoger:

- El nivel de conocimiento de operación con itinerario.
- El nivel de conocimiento del itinerario.
- El tiempo de programación de llegada al paradero.
- Tiempo de espera percibido en el paradero.
- La percepción de cumplimiento de los buses.
- Minutos de retraso en caso de no cumplir el itinerario.
- Valoración de la forma de operar.

4.3.1. Enfoque para toma de datos

El método de las preferencias declaradas se orienta en generar diferentes escenarios hipotéticos de elección, para que luego el encuestado deba hacer una determinada elección en base a sus intereses. Este método es ventajoso debido a que se puede obtener una gran cantidad de datos a un bajo costo, pero se pueden generar situaciones no observables en la realidad, las cuales no reflejan el comportamiento real del usuario. Este problema es llamado sesgo hipotético, En esta memoria, como los servicios basados en itinerarios ya existen y se puede entrevistar a los usuarios directamente sobre sus preferencias, se adopta el enfoque de preferencias reveladas.

Por otra parte, el método de preferencias reveladas se basa en observar situaciones de la vida cotidiana, obteniendo elecciones reales de los usuarios. La principal ventaja del método es que mira

el comportamiento real de las personas, obteniendo información precisa sobre la toma de decisiones que realizan, pero este método posee ciertas desventajas, debido al alto costo que implica llevarlo a cabo y su imposibilidad de analizar las decisiones de las personas en situaciones hipotéticas que no existan en la realidad.

Debido a que se quiere conocer el comportamiento de los usuarios en los servicios que sean operados con itinerarios, y como estos servicios ya existen y se puede entrevistar a sus usuarios directamente sobre sus elecciones y preferencias, se decide llevar a cabo la toma de datos mediante la metodología de encuestas de preferencias reveladas.

4.3.2. Encuesta Piloto

Se llevó a cabo una encuesta piloto la primera semana del mes de octubre de 2018, para los servicios C08, C12, C13, C19, H12. Se seleccionaron servicios que operen con un buen nivel de cumplimiento de los itinerarios (C08, C12, C13, C19) y un mal nivel de cumplimiento (H12), de acuerdo a información provista por DTPM.

La encuesta se realiza con el fin de conocer, principalmente, el nivel de conocimiento de la operación en modo itinerario de los servicios mencionados. Se encuestaron a un total de 54 personas, en 2 paraderos presentados en la Tabla 4.5. Se eligieron los paraderos con mayor cantidad de subidas observadas.

Tabla 4.5. Ubicación paraderos, encuesta piloto.

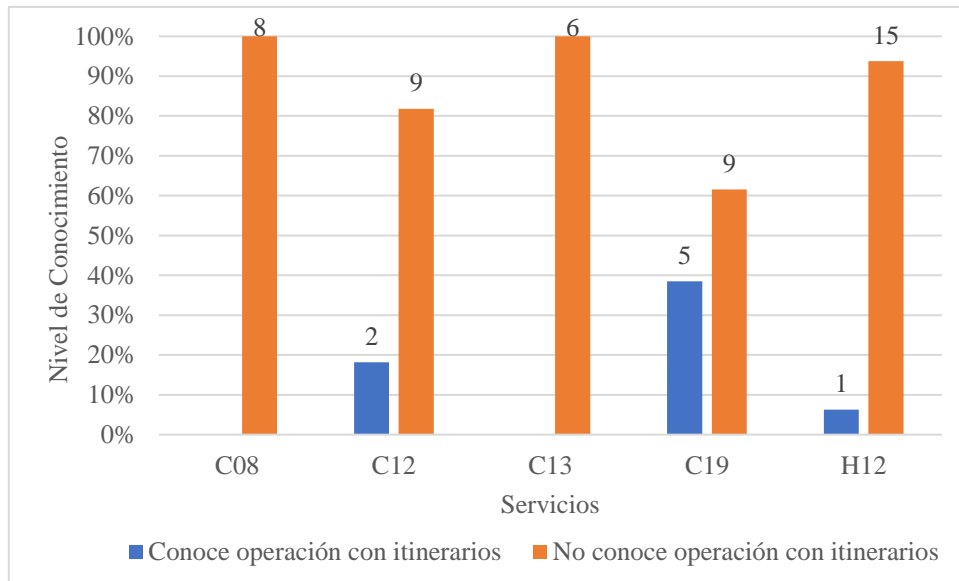
Servicio	Código Paradero	Ubicación
C08, C12, C13, C19	PC423	Camino de Asís / esq. Escrivá de Balaguer, comuna de Las Condes.
H12	PH111	Gran Avenida Esq. / Gambetta, comuna de San Miguel.

En la Tabla 4.6 se presentan la cantidad de encuestas realizadas según cada servicio. En la Ilustración 4.2 se resume el nivel de conocimiento encontrado para cada servicio.

Tabla 4.6. Catastro, encuesta piloto.

SERVICIO	MUESTRAS
C08	8
C12	11
C13	6
C19	13
H12	16
Total	54

Ilustración 4.2. Nivel de conocimiento operación modo itinerario, encuesta piloto.



Se determinó que un 15% de las personas encuestadas conoce la operación con itinerarios, mientras que un 85% de ellas no. Esto se puede deber a una falta de información al usuario sobre la existencia de este tipo de medidas, producto de que en la actualidad existe un solo servicio donde se despliegan, en algunos paraderos, los horarios en forma física. Para el resto de los servicios la información se encuentra disponible en el sitio web de DTPM⁴.

El tiempo promedio de realización de la encuesta fue de 8 minutos, por lo que se decide eliminar tres preguntas referentes a: el propósito de su viaje, la manera en que se informa sobre la medida y las etapas del viaje. Esto se justifica debido a la irrelevancia de esta información para el estudio y para reducir la extensión de la encuesta, con el fin de minimizar los errores muestrales.

Al momento de seleccionar el paradero piloto no se consideró el efecto de elegir un paradero en el cual opere más de un servicio, esto causa endogeneidad en los datos producto de que el usuario percibe un tiempo de espera menor al utilizar más de un servicio de buses. Por este motivo, para la toma de encuesta oficial se midieron solo paraderos que fueran servido por un único servicio.

La encuesta piloto se presenta en el anexo C.

⁴ <https://www.transantiago.cl/itinerarios> (Accedido el 03/03/2019).

4.3.3. Tamaño muestral

Con la proporción de la muestra que conoce la medida (π), estimada anteriormente, se procede a determinar el tamaño de la muestra necesario. Se considera un error permitido (d) de un 5% y una confianza deseada (α) de un 95%, luego, el tamaño muestral (N_s) se determina a partir de la Ecuación 4.9.

$$N_s = \frac{Z_{\left(\frac{1-\alpha}{2}\right)}^2 * \pi * (1 - \pi)}{d^2} \quad (4.9)$$

Se calcula un tamaño muestral mínimo de 196 personas. En la práctica, las encuestas se distribuirán equitativamente en 9 servicios seleccionados.

4.3.4. Estructura

Uno de los objetivos al construir la encuesta fue reducir los errores que se generaron a partir de textos confusos o preguntas poco claras, entre otras. La encuesta se divide en 4 secciones, con un total de 18 preguntas.

La primera detalla una breve introducción, explicando el propósito de la memoria, los fines de los datos recogidos y detallando un sorteo al final del proceso de recolección de datos. Además, se explicita la confidencialidad de los datos entregados.

En la segunda sección se le pregunta al usuario el servicio que utiliza, para verificar que sea uno de interés, su correo electrónico, en caso de querer participar en el sorteo y se pregunta sobre su experiencia en el sistema de transporte público. En ella se le pide al usuario evaluar con nota del 1 al 7 el sistema de transporte público de Santiago (Transantiago) y el recorrido que utiliza.

Luego, se realiza una sección de preguntas de hábitos y conocimiento del servicio. Esta sección es la que tiene mayor relevancia dentro de la encuesta. De ella se obtendrán los datos para determinar el costo total de operación. Aquí se le pregunta si conoce el modo de operación del servicio, el itinerario, la valoración de la medida, el tiempo de programación de llegada y el tiempo de espera percibido.

Finalmente, se le pregunta al usuario sobre información del sistema y calidad del servicio. Se pregunta sobre su experiencia respecto al nivel de detención de buses y tiempo de utilización del servicio.

Con respecto al formato de respuestas en la encuesta, existen tres tipos: respuestas únicas (R.U), las cuales el usuario puede responder una única alternativa. Aquellas con respuesta múltiple (R.M), donde se marcan todas las alternativas que el usuario declare utilizar o conocer. Finalmente, existen respuestas donde se registra el tiempo declarado por el usuario, como son tiempo de espera en paradero, tiempo de programación, minutos de incumplimiento del itinerario.

4.3.5. Encuesta presencial

La encuesta presencial se realizó durante el mes de noviembre de 2018. Se eligieron servicios de 4 operadores, con diferentes niveles de cumplimiento de puntualidad. Los servicios seleccionados fueron: G02, G07, H12, J06, J11, J17, C08, C13, C19.

La encuesta fue realizada solo en horas fuera de punta, dentro de los periodos en estudio. Además, se seleccionaron paraderos que solo fueran servidos por un servicio en estudio. En la Ilustración 4.3 se muestra un ejemplo de un paradero que cumple las condiciones mencionadas para ser encuestado. Los paraderos seleccionados se resumen en la Tabla 4.7.

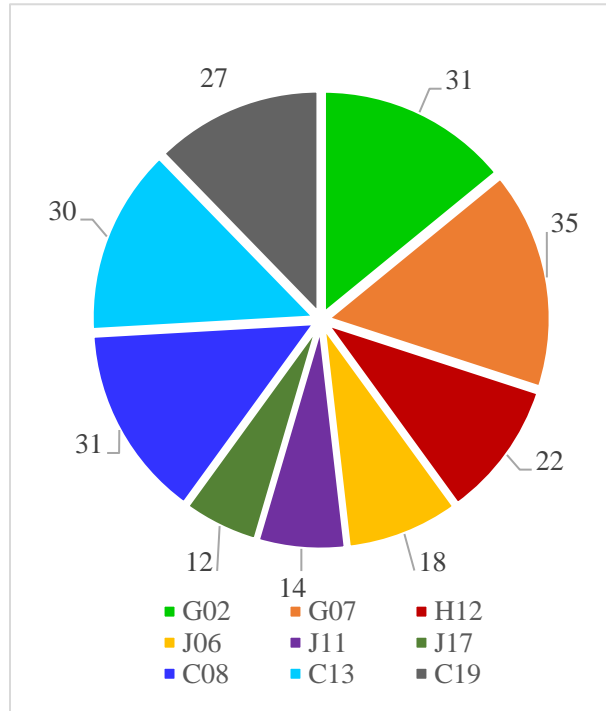
Ilustración 4.3. Paradero encuestado servicio J06.



Tabla 4.7. Ubicación paraderos, encuesta presencial.

Servicio	Código Paradero	Ubicación	Comuna
G02	PG261	Parada 2/Est. Maestranza	San Bernardo
G07	PG797	Pedro de Mendoza /Esq. Santa Marta	San Bernardo
H12	PH602	Avenida Cerrillos/Esq. Pasaje 13 Sur	Lo Espejo
J06	PJ1031	San German/Esq. Los Tamarindos	Lo Prado
J11	PJ941	Doña Isabel/Esq. La Macarena	Pudahuel
J17	PJ1059	Pedro Jorquera/Esq. Puerto Vespucio	Pudahuel
C08	PC766	Camino Real/Esq. Golf de Manquehue	Lo Barnechea
C13	PC919	Camino de La Laguna/Esq. Camino del Sol	Lo Barnechea
C19	PC1009	Bernardo Larraín C./Esq. Pedro Lira Urquieta	Lo Barnechea

Ilustración 4.4. Distribución muestral, encuesta presencial.



Se realizaron un total de 220 encuestas, distribuidas en los 9 servicios encuestados, según la Ilustración 3.4.

Se buscó tener una cantidad similar de respuestas para servicios que tengan un buen cumplimiento de puntualidad (J06, J11, J17, C08, C13, C19) y un mal cumplimiento de puntualidad (G02, G07, H12) (Ilustración 1.2).

En la Ilustración 4.5 se presenta la distribución del horario de uso de los servicios. Se observa que una gran cantidad de los usuarios declaran utilizar los servicios en horarios punta, lo que sugiere estudiar la opción de una operación con itinerarios para estos periodos.

Luego, es interesante analizar el porcentaje de conocimiento de la operación con itinerarios que existe en la población. En la Ilustración 4.6 se observa, en azul, los pasajeros que conocen la forma de operación, promediando todos los servicios, el conocimiento alcanza un 30% en la muestra.

La Ilustración 4.7 muestra la cantidad de pasajeros que conocen el itinerario, dado que saben el modo de operación. Se concluye que el pasajero al saber de la operación se informa del itinerario de pasada del servicio.

Ilustración 4.5. Horario uso en día laboral, encuesta presencial.

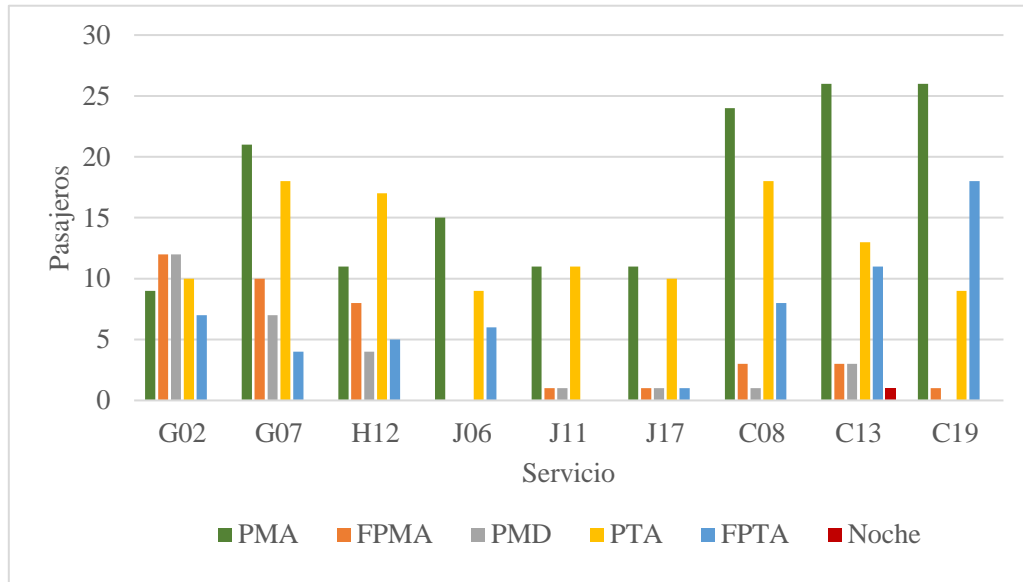


Ilustración 4.6. Nivel de conocimiento de operación con itinerarios, encuesta presencial.

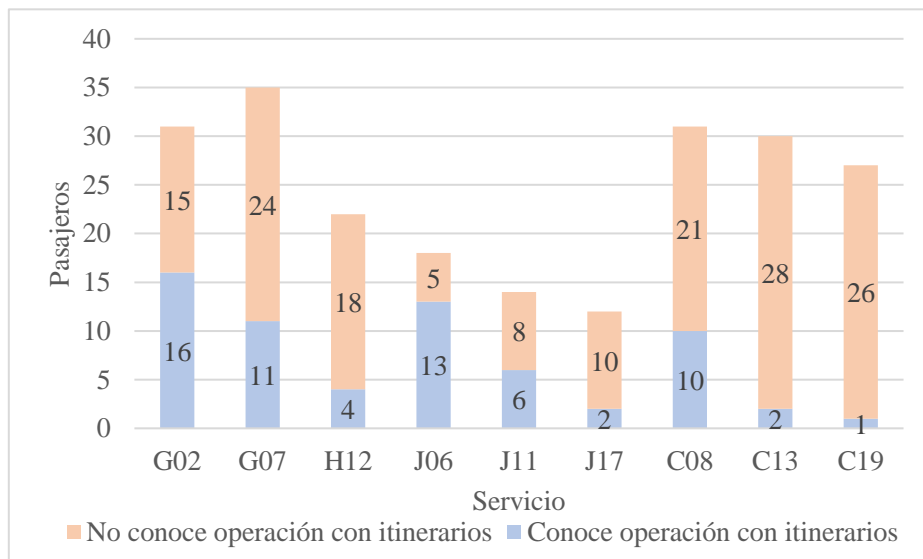
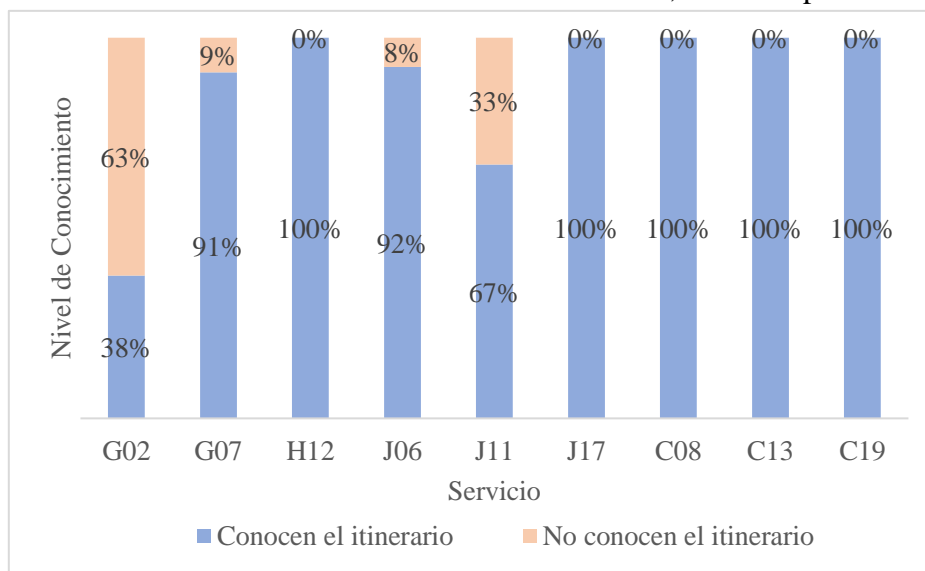


Ilustración 4.7. Nivel de conocimiento del itinerario, encuesta presencial.



Se destaca un nivel de conocimiento mayor en comparación al concluido en la encuesta piloto. Esto se puede deber a que los encuestados pertenecen a paraderos donde opera exclusivamente el servicio encuestado, por lo que se puede concluir que el pasajero se informa y programa mejor su viaje al poseer menos servicios complementarios en su viaje. Pero en todo caso, el grado de conocimiento de la medida es menor al 50%.

En la Tabla 4.8 se presenta el tiempo de programación y tiempo de espera de cada servicio encuestado. Producto de problemas encontrados en los datos, la base de datos recogida es filtrada de acuerdo a dos criterios. En primer lugar, se consideró que una persona que declara un tiempo de programación mayor a 10 minutos no comprendió a cabalidad la pregunta, por lo que se descartaron dichas observaciones. El segundo filtro corresponde al tiempo de espera, en donde se filtraron las observaciones que declaran un tiempo de espera mayor a 2 veces del tiempo aceptable. Además, los datos fueron separados de acuerdo al conocimiento del modo de operación y su itinerario.

El tiempo de programación del usuario corresponde al tiempo que declara anticipará su llegada al paradero, por otra parte, las personas que no conocen el itinerario declaran el tiempo que se programaría para llegar el paradero. Como se observa, en promedio la persona declara un menor tiempo de espera al conocer el itinerario, del mismo modo, la persona programa de mejor manera su llegada al paradero. Los tiempos declarados se presentan en la Tabla 4.8.

El intervalo promedio corresponde al cálculo realizado en la Sección 4.2.3 a través del código programado en Python. Este cálculo considera la variación de regularidad de operación, de los servicios en estudio, entre los años 2017 y 2018, presentado en la Tabla 4.3.

Se realizó el cálculo de la sobreestimación del tiempo de espera del usuario, siendo la razón entre el tiempo de espera declarado y el intervalo promedio. Este valor muestra la diferencia en cómo los pasajeros perciben el tiempo de espera en paradero y el intervalo observado, que refleja la esperanza del tiempo de espera considerando la variabilidad de los intervalos. Se concluye que, al no conocer el itinerario, el pasajero sobreestima su tiempo de espera en un 40% más, que al conocerlo. Generar esfuerzos en informar a los usuarios sobre los itinerarios llevaría a una mejor calidad de servicio y un ahorro de tiempo.

Finalmente, los pasajeros, que conocen el itinerario, declaran un nivel de cumplimiento de un 90%. En el caso de no cumplirlo, declararon un retraso de 7 minutos en promedio. Además, se destaca que los un 86% de los encuestados valoraría la existencia de operación con itinerarios.

Tabla 4.8. Tiempo de programación y espera, encuesta presencial.

Operador	Servicio	Intervalo Promedio [Min]	Conoce Operación con Itinerarios			No Conoce Operación con Itinerarios		
			Tiempo de Programación [Min]	Tiempo de Espera [Min]	Sobre-estimación [-]	Tiempo de Programación [Min]	Tiempo de Espera [Min]	Sobre-estimación [-]
Subus	G02	8,2	6,3	17,8	2,2	8,5	17,7	2,2
Subus	G07	8,5	8,3	11,0	1,3	8,4	19,2	2,2
Vule	H12	8,1	8,8	11,3	1,4	9,2	22,6	2,8
Metbus	J06	17,5	8,0	12,3	0,7	10,0	12,0	0,7
Metbus	J11	12,1	8,5	17,0	1,4	10,0	16,9	1,4
Metbus	J17	15,2	10,0	17,5	1,2	10,0	14,5	1,0
Redbus	C08	7,7	5,7	10,0	1,3	8,0	14,3	1,9
Redbus	C13	14,2	10,0	15,0	1,1	8,7	18,1	1,3
Redbus	C19	11,5	10,0	5,0	0,4	10,0	14,4	1,3
Promedio		11,4	8,4	13,0	1,2	9,2	16,6	1,6

Fuente: Elaboración propia.

La encuesta realizada se presenta en el anexo D.

4.3.6. Encuesta online

Se generó una encuesta online que siguiera la misma estructura de la encuesta presencial. Se realizó mediante la aplicación Transapp, donde se informó a los usuarios que utilizaban estos servicios la existencia de una encuesta y se les daba la opción de responderla. Esta encuesta es una versión reducida de la anterior, debido al poco tiempo que puede durar una encuesta online, solo se realizaron 6 preguntas, recogiendo la información más importante para el estudio.

Se recibieron 269 observaciones, en un plazo de una semana, tiempo el cual duró abierta la encuesta. Se destaca que el 90% de ellas se recibieron dentro del primer día de subida la encuesta.

Se estimó que el 53% de las personas conoce el itinerario (Ilustración 4.8), este valor puede estar sesgado debido a una barrera tecnológica, donde solo se realizan observaciones en personas que utilizan esta herramienta.

Esta base de datos no se utilizó producto de un problema al momento de diseñar la encuesta. En ella se permite seleccionar más de un servicio utilizado, creando el mismo problema comentado en la encuesta piloto. Esto induce a un error en las observaciones, por lo que se decide no utilizar esta información. Es destacable el potencial de esta herramienta, ya que permite encuestar a una mayor cantidad de gente en un corto periodo de tiempo y a bajo costo.

Ilustración 4.7. Nivel de conocimiento agregado de operación con itinerarios, encuesta online.

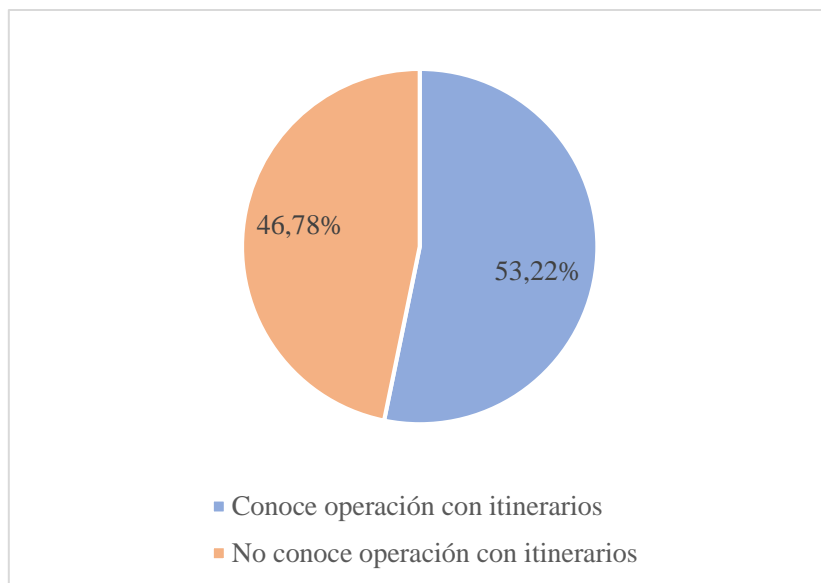
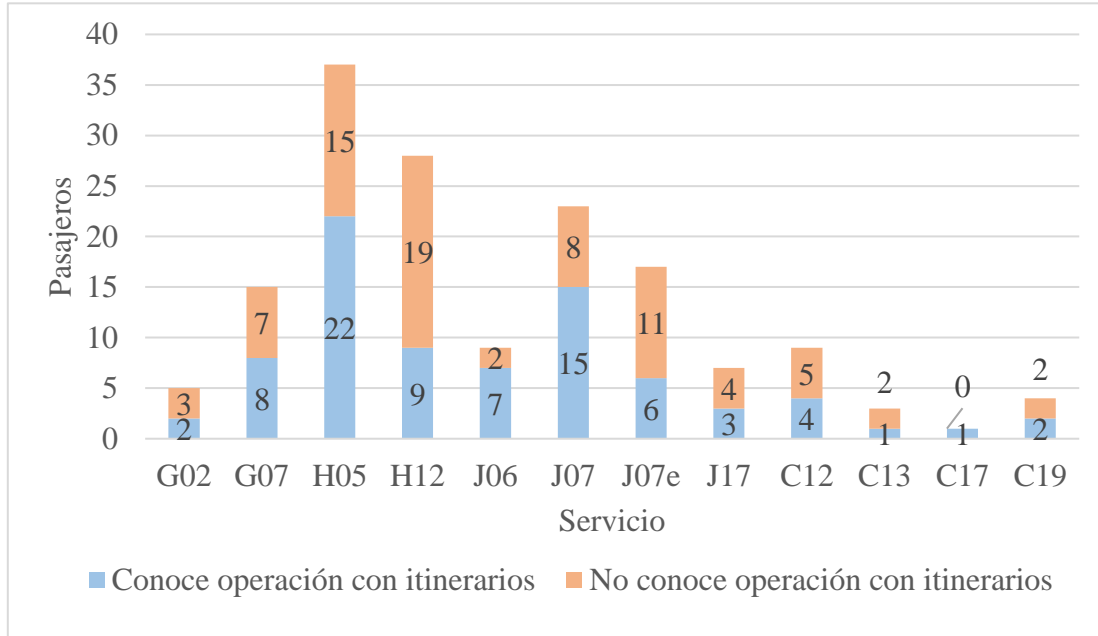


Ilustración 4.9. Nivel de conocimiento agregado de operación, encuesta online.



En la Ilustración 4.9 se presenta se observa por cada servicio el nivel de conocimiento de la operación con itinerarios. En ella, solo se consideran las observaciones que poseen un servicio declarado de acuerdo al problema mencionado anteriormente, por lo que la suma no corresponde a las 269 observaciones.

La encuesta online se presenta en el anexo E.

4.3.7. Resultados encontrados

Concluyendo esta sección, en la Tabla 4.9 se resumen los datos utilizados para el cálculo de los costos totales de los servicios en estudio. Se destaca con negritas los servicios encuestados. En caso de los servicios que no fueron encuestados, se les asignó el promedio del valor encontrado. Para los servicios que operan actualmente con frecuencia se aplican estos valores en el modelo cuando se asume una operación con itinerarios.

Tabla 4.9. Datos encuestados para servicios en estudio.

Servicio	Modo de Operación	Nivel de Conocimiento [%]	Tiempo de Programación [Min]	Nivel de Cumplimiento [%]
G02	Itinerario	52%	7,4	72%
G07	Itinerario	31%	8,4	72%
321	Frecuencia	30%	8,3	72%
350	Frecuencia	30%	8,3	72%
H02	Frecuencia	30%	8,3	72%
H04	Frecuencia	30%	8,3	72%
H05	Frecuencia	30%	8,3	72%
H05c	Itinerario	30%	8,3	72%
H09	Frecuencia	30%	8,3	72%
H12	Itinerario	18%	9,0	72%
H14	Frecuencia	30%	8,3	72%
I05	Frecuencia	30%	8,3	72%
J06	Itinerario	72%	9,0	81%
J11	Itinerario	43%	9,3	81%
J17	Itinerario	17%	8,3	81%
B04v	Frecuencia	30%	8,3	77%
B10	Frecuencia	30%	8,3	77%
B11	Frecuencia	30%	8,3	77%
B15	Frecuencia	30%	8,3	77%
B17	Frecuencia	30%	8,3	77%
B19	Frecuencia	30%	8,3	77%
B23	Frecuencia	30%	8,3	77%
B24	Frecuencia	30%	8,3	77%
B25	Frecuencia	30%	8,3	77%
C04	Frecuencia	30%	8,3	77%
C08	Itinerario	32%	6,8	77%
C12	Itinerario	30%	8,3	77%
C13	Itinerario	7%	8,3	77%
C17	Itinerario	30%	8,3	77%
C19	Itinerario	4%	8,3	77%
F03c	Itinerario	30%	8,3	82%

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 5

5. Resultados y Análisis

En el presente capítulo se presentan los resultados de la aplicación del modelo microeconómico para la determinación de la frecuencia (para un itinerario factible) que minimiza los costos totales de cada servicio. Para determinar los efectos de los diferentes factores en la optimización de la frecuencia se utilizarán diferentes escenarios de comparación.

En un principio, se define un escenario base y sobre él se analizará la influencia que tienen diferentes factores en la función de costos, estos son: el hacinamiento del bus como un factor que incrementa el valor del tiempo de los usuarios, la sensibilidad del tiempo de programación al itinerario de operación, la irregularidad de los intervalos, el nivel de conocimiento de la medida y el tiempo de programación de los usuarios.

De esta forma, se quiere cuantificar la influencia en los costos y también la medida en la que estos impactan en la determinación de la frecuencia para los 31 servicios en estudio.

5.1. Optimización del modelo: Caso base

En esta sección se realizará el proceso de optimización descrito en el Capítulo 3. En primer lugar, se procederá a calcular la frecuencia óptima y el costo total mínimo de operación para la situación actual del sistema, para 3 escenarios distintos.

Luego, debido a la baja demanda que presentan los servicios en estudio, las frecuencias estimadas no son comparables a las actuales vigentes en el sistema por lo que se procederá a amplificarla con el fin de tener un caso comparable al que actualmente se utiliza.

Finalmente, se define un escenario ideal de operación el cual se utilizará para comparar los efectos en los costos de los factores antes descritos.

5.1.1. Optimización del modelo vigente

Para estos escenarios se utilizaron todos los servicios en estudio, utilizando los datos detallados en el Capítulo 4. El primer escenario contempla analizar el modo actual de operación, donde 13 servicios son operados según un itinerario fijo, mientras que 18 son operados en modo frecuencia. Para representar el último grupo dentro del modelo consideraremos un nivel de conocimiento de la medida (α) por parte de los usuarios de un 0%. A este caso se le denominó Caso A.

En el segundo escenario se consideró que todos los servicios son operados según un itinerario fijo, para mostrar este caso se fijó para todos los servicios que operan por frecuencia un nivel de

conocimiento de la medida de un 29,5% y un tiempo de programación de 8,4 minutos, que corresponden al promedio de lo encontrado en los servicios encuestados, presentados en la Tabla 4.9. A este caso se le denominó Caso A1.

Para los dos casos descritos anteriormente se utilizaron la actual frecuencia programada del sistema, mientras que, para el tercer escenario, considerando que todos los servicios son operados según un itinerario fijo, se calculó el costo mínimo de operación acorde a los intervalos factibles de operación, estos corresponden a intervalos de 10, 12, 15, 18, 20 o 30 minutos entre cada expedición. A este caso se le denominó Caso A2.

Para ello se programó un código en Matlab que calcula el valor de la función de costo total presentada en el Capítulo 3. utilizando valores de frecuencia entera desde f_{min} hasta f_{max} . Así, el programa calcula los costos para todo intervalo factible y elige el que tiene el menor costo total para el sistema.

El costo total de operación para los 31 servicios se presenta en la Tabla 5.1, en ella se puede apreciar que si consideramos que todos los servicios en estudio operaran con itinerario fijo (Caso A1) existiría un aumento en el costo de espera en relación a la operación actual (Caso A). Esto se debe a una mala programación por parte de los usuarios, lo cual genera un uso menos eficiente de su tiempo, aumentando su costo de espera y, por ende, el costo total del sistema. Se destaca que debido a que la frecuencia de operación de los servicios no cambia (Tabla 5.2), no varían los costos de operación del sistema.

En el escenario optimizado para los intervalos factibles (Caso A2), se observa una baja considerable en los costos de operación, pero un aumento en los costos que el usuario percibe. Esto se debe a una reducción en la frecuencia programada, producto de que el sistema no responde acorde a la demanda de los servicios, sino a un estándar mínimo de calidad, por lo que los intervalos actuales son menores que los calculados en el Caso A2. Esta reducción de costos de operación genera un *tradeoff*, aumentando los costos de viaje producto del aumento en la ocupación del bus (hacinamiento y tiempos de detención) y, mayormente los costos de espera producto de la reducción en la frecuencia. Cabe destacar que, en este escenario, el costo mínimo observado para todos los servicios se encontró para buses de 8 metros.

Tabla 5.1. Resultados para el Caso A.

	Caso A	Caso A1	Var.	Caso A2	Var.
Costo Operacional	\$ 16.275.639	\$ 16.275.639	0%	\$ 9.199.914	-43%
Costo de viaje	\$ 2.326.771	\$ 2.326.771	0%	\$ 2.632.603	13%
Costo de espera	\$ 3.724.259	\$ 3.990.888	7%	\$ 6.829.780	83%
Costo Total	\$ 22.326.669	\$ 22.593.298	1%	\$ 18.662.297	-16%

Tabla 5.2. Intervalos calculados para el Caso A.

Frecuencia		
Servicio	Intervalos Casos A y A1 [Min]	Intervalo Caso A2 [Min]
321	14,0	30,0
350	13,8	30,0
H02	13,6	30,0
H04	13,6	30,0
H05	13,8	20,0
H09	13,8	30,0
H14	14,5	30,0
I05	15,0	18,0
B04v	15,0	30,0
B10	12,2	20,0
B11	13,9	30,0
B15	12,8	30,0
B17	12,2	30,0
B19	12,9	30,0
B23	15,0	30,0
B24	14,3	30,0
B25	14,6	30,0
C04	15,0	30,0

Itinerario		
Servicio	Intervalos Casos A y A1 [Min]	Intervalo Caso A2 [Min]
G02	15,0	30,0
G07	15,0	30,0
H05c	15,0	30,0
H12	15,0	30,0
J06	34,4	30,0
J11	22,1	30,0
J17	30,0	30,0
C08	14,6	30,0
C12	16,7	30,0
C13	27,3	30,0
C17	30,0	30,0
C19	20,2	30,0
F03c	19,4	30,0

Este último análisis motiva a informar activamente a los usuarios y mejorar la regularidad de operación de servicios operados con itinerario fijo. Esto con el fin de generar un mayor conocimiento de la forma de operación y una reducción en los tiempos de programación. Lo anterior podría ocurrir siempre y cuando los usuarios tengan la certeza de que disminuirá su tiempo total de viaje, siendo un importante punto la confiabilidad que el usuario posee en el sistema.

5.1.2. Optimización del modelo con demanda amplificada

Al buscar optimizar las frecuencias de los servicios de acuerdo a la metodología presentada en el Capítulo 3, se observa que las demandas utilizadas en los escenarios anteriores, presentadas en la Tabla 4.4, son bajas y los intervalos de operación que se encuentran actualmente vigentes en el sistema responden a un estándar de calidad mínimo. Por esta razón, y para poder correctamente utilizar la metodología propuesta, al menos de referencia para entender el efecto de los diferentes factores que influyen los costos totales de operación con itinerario, se hace necesario amplificar la demanda de todos los servicios.

Para determinar el factor de ampliación, se calcularon los costos totales y frecuencia de operación para diferentes niveles de demanda, eligiendo el factor que, buscando minimizar los costos totales, estima las frecuencias en torno a las vigentes actualmente. Del mismo modo que antes, las frecuencias se aproximaron a los intervalos factibles de operación, utilizando solamente 10, 12, 15, 18, 20 o 30 minutos entre cada expedición. En la Tabla 5.3 se muestra demanda de cada servicio ampliada previamente por 3, la frecuencia óptima para cada servicio y la frecuencia finalmente considerada.

Tabla 5.3 Intervalos y demanda calculada para el Caso B.

Servicio	Demanda Amplificada [Pax/h]	Intervalo Óptimo [Min]	Intervalo Factible [Min]	Servicio	Demanda Amplificada [Pax/h]	Intervalo Óptimo [Min]	Intervalo Factible [Min]
G02	446	17,30	18	B04v	429	17,99	18
G07	657	11,74	12	B10 ²	1008	13,78	15
321	563	12,64	12	B11	675	11,44	12
350	666	11,58	12	B15	370	15,21	15
H02	552	13,98	15	B17	675	11,43	12
H04	501	15,01	15	B19 ¹	791	11,70	12
H05 ¹	874	10,60	10	B23	240	20,57	20
H05c	246	16,90	18	B24	532	14,49	15
H09	755	10,22	10	B25	435	15,76	15
H12	607	12,71	12	C04	661	11,66	12
H14	573	13,46	15	C08	350	18,43	18
I05 ²	1377	10,09	10	C12	400	19,27	20
J06	40	30,00	30	C13	109	28,89	30
J11	156	29,86	30	C17	194	22,92	20
J17	175	27,25	30	C19	169	20,19	20
				F03c	375	17,54	18

(1): Costo mínimo observado para un tamaño de bus de 10 metros.

(2): Costo mínimo observado para un tamaño de bus de 12 metros.

A continuación, en la Tabla 5.4 se calcularon los costos totales para la nueva demanda que estamos imponiendo, en el Caso B se estimaron los costos para la frecuencia óptima de operación (Análogo al Caso A1), mientras que en el Caso B1 se estimaron los costos para la frecuencia factible de operación presentada en la tabla anterior. Para ambos casos se consideró que todos los buses son operados con itinerarios. Cabe destacar que para los servicios H05 y B19 el costo mínimo de operación se encontró para un tamaño de buses de 10 metros, mientras que para los servicios I05 y B10 se encontró para un tamaño de buses de 12 metros.

Tabla 5.4 Resultados para el Caso B.

	Caso B	Caso B1	Var.
Costo operacional	\$ 19.604.641	\$ 19.881.370	1%
Costo de viaje	\$ 8.893.607	\$ 8.824.224	-1%
Costo de espera	\$ 11.513.205	\$ 11.356.309	-1%
Costo total	\$ 40.011.453	\$ 40.061.902	0%

En ella se observa un leve aumento de los costos operacionales al momento de calcular los servicios dentro del intervalo factible, esto se debe a que, en promedio, aumenta en 0.3 buses/hora la frecuencia de operación de los servicios. Además, este efecto genera una leve disminución en los costos que percibe el usuario producto de una reducción en los tiempos de detención en paradas y una espera menor. En otras palabras, se puede observar el *tradeoff* que existe entre los costos del operador y los costos del usuario ante un aumento en la frecuencia de operación.

5.1.3. Optimización del modelo para un escenario ideal

Así, debido a la amplificación de demanda, es posible construir un escenario base comparativo a las frecuencias vigentes del sistema. Para poder analizar el efecto puro de las variables en estudio se propone un escenario ideal de operación, el cual asume un nivel de conocimiento del itinerario para todos los servicios de un 60% y un tiempo de programación de los usuarios de 4 minutos. También, se asume que un 35% de los usuarios viaja en la sección más cargada, siguiendo lo propuesto por Tirachini (2010).

A continuación, en la Tabla 5.5 se presentan los resultados para este nuevo caso. El Caso C hace referencia a los costos estimados para el Caso B1, en el cual se utilizaron los parámetros obtenidos a través de las encuestas PR (Tabla 4.9). Mientras que el Caso C1 utiliza los valores del usuario descritos anteriormente, buscando simular un escenario ideal e igualitario para todos los servicios.

Tabla 5.5. Resultados para el Caso C.

	Caso C	Caso C1	Var.
Costo operacional	\$ 19.881.370	\$ 18.547.545	-7%
Costo de viaje	\$ 8.824.224	\$ 9.277.277	5%
Costo de espera	\$ 11.356.309	\$ 10.228.543	-10%
Costo total	\$ 40.061.902	\$ 38.053.366	-5%

En la Tabla 5.5 se observa una disminución importante en los costos totales de operación. Por una parte, resulta interesante ver la disminución en el costo de espera que percibe el usuario cuando este conoce el itinerario de pasadas y programa de forma eficiente su llegada al paradero. Además, en la Tabla 5.6 se observa una disminución en la frecuencia de operación. Esto conlleva que el costo de viaje de los usuarios se incremente producto de la mayor ocupación y, por ende, un mayor tiempo de detención de los buses en paraderos y una mayor incomodidad por el aumento en la ocupación promedio de los servicios.

Por otra parte, producto de que se genera esta posibilidad de optimizar la frecuencia de algunos recorridos, se requerirán menos buses en la operación, generando beneficios para el operador (Tabla 5.5). Se concluye, que el incremento observado en los costos de viaje es menor que la disminución en los costos de espera y operación estimados, por lo que se evidencia el beneficio, en los servicios operados itinerarios, cuando los usuarios se encuentran bien informados.

Tabla 5.6. Intervalos calculados para el Caso C.

Servicio	Intervalo Caso C [Min]	Intervalo Caso C1 [Min]
G02	18	20
G07	12	12
321	12	12
350	12	15
H02	15	15
H04	15	18
H05 ¹	10	12
H05c	18	18
H09	10	10
H12	12	12
H14	15	18
I05 ²	10	10
J06	30	30
J11	30	30
J17	30	30

Servicio	Intervalo Caso C [Min]	Intervalo Caso C1 [Min]
B04v	18	20
B10 ²	15	15
B11	12	12
B15	15	15
B17	12	15
B19 ¹	12	12
B23	20	20
B24	15	18
B25	15	18
C04	12	15
C08	18	20
C12	20	20
C13	30	30
C17	20	20
C19	20	20
F03c	18	18

(1): Costo mínimo observado para un tamaño de bus de 10 metros.

(2): Costo mínimo observado para un tamaño de bus de 12 metros.

El resultado obtenido en la discusión anterior es de suma relevancia para el presente trabajo. Esto se debe a que una de las interrogantes es concluir si es beneficioso operar servicios de transporte público de baja demanda con un itinerario fijo de pasadas. El resultado anterior indicaría que, si existen beneficios, por lo que se justifica realizar un trabajo activo en informar a los usuarios. Esto último, con el fin de elevar el nivel de conocimiento de los itinerarios y reducir el tiempo de programación.

Finalmente, se realiza un análisis de sensibilidad, con el objetivo de entender el efecto en los costos totales que generan el nivel de conocimiento de la medida, el tiempo de programación de los usuarios, la sensibilidad del tiempo de programación al itinerario de operación, el hacinamiento del bus y la regularidad de operación. Para ello se utilizará el Caso C1 como caso base para los siguientes escenarios comparativos.

5.2. Análisis de sensibilidad de las variables en estudio

En esta sección se analizarán los efectos que posee el hacinamiento en el costo de viaje del usuario, el tiempo de programación y la regularidad del intervalo del servicio. Utilizando el Caso C1 como escenario comparativo, se calculará la variación de costos que conlleva un cambio en los parámetros antes mencionados.

Además, para un escenario promedio de los servicios en estudio, se analizará el impacto del nivel de conocimiento de la medida y el tiempo de programación en el costo total del servicio.

5.2.1. Efecto de un P_v sensible al hacinamiento

Los usuarios del sistema de transporte público perciben importantes costos en su uso, por lo que es fundamental incorporarlos al modelo microeconómico para el correcto desarrollo del viaje. Estos costos son la motivación principal de este trabajo, ya que se quiere conocer el efecto de ellos y sus implicancias para los costos del sistema.

Uno de los costos que percibe el usuario es el de hacinamiento, el cual tiene directa relación con la disposición a pagar del usuario por reducir su tiempo de viaje. Es decir, mientras mayor sea el hacinamiento del bus, mayor será el valor del tiempo de viaje. El efecto del hacinamiento en este valor ha sido ampliamente estudiado (Whelan y Crockett, 2009; Wardman y Whelan, 2011; Tirachini et al., 2013). Específicamente, para el sistema de transporte público de Santiago, Batarce et al. (2015) estimó el valor del tiempo de viaje para distintos niveles de ocupación (Sección 3.2.2).

El modelo en su caso base (Caso C1) ya incorpora el efecto del hacinamiento. Para conocer las implicancias que tiene este efecto en los costos totales se crea un escenario donde el valor del tiempo de viaje es constante y no varía proporcionalmente al hacinamiento del bus. Se utilizará el valor del tiempo de viaje reportado por Batarce et al. (2015), este valor supone una baja ocupación del bus ($1 - 2 \text{ pax}/m^2$) y se estima en \$2,626 por hora.

A continuación, en la Tabla 5.7 se presentan los costos calculados para un escenario con valor de tiempo de viaje constante y uno sensible al hacinamiento. Comparando el efecto del hacinamiento para una operación con itinerarios y una operación con frecuencia.

Tabla 5.7. Resultados para el caso sensible al hacinamiento.

		Operación Itinerarios	Operación Frecuencia	Var.
Caso P_v sensible	Costo Operacional	\$ 18.547.545	\$ 18.547.545	0%
	Costo de viaje	\$ 9.277.277	\$ 9.277.277	0%
	Costo de espera	\$ 10.228.543	\$ 10.474.799	2%
	Costo total	\$ 38.053.366	\$ 38.299.621	1%
Caso P_v constante	Costo Operacional	\$ 17.948.293	\$ 17.948.293	0%
	Costo de viaje	\$ 8.175.466	\$ 8.175.466	1%
	Costo de espera	\$ 10.418.481	\$ 10.720.436	3%
	Costo total	\$ 36.542.240	\$ 36.844.195	1%

En la Tabla 5.7, se observa una disminución en los costos cuando no se considera el efecto de hacinamiento. Lo anterior se explica ya que, al no considerar el impacto en la calidad del viaje percibida por el usuario, el modelo falla. Al no recoger el aumento de la disposición a pagar por reducir el tiempo de viaje en situaciones de alta ocupación, ocurre esto. Esto se traduce en una reducción en la frecuencia de operación (Tabla 5.8), debido a que el modelo responde a reducir los costos de operación en un escenario donde el costo de viaje tiene una menor influencia.

Tabla 5.8. Intervalos calculados para el caso sensible al hacinamiento.

Servicio	Intervalo caso P_v sensible [Min]	Intervalo caso P_v constante [Min]	Servicio	Intervalo caso P_v sensible [Min]	Intervalo caso P_v constante [Min]
G02	18	18	B04v	18	18
G07	12	12	B10 ²	15	15
321	12	15	B11	12	12
350	12	12	B15	15	20
H02	15	15	B17	12	12
H04	15	15	B19 ¹	12	12
H05 ¹	10	10	B23	20	30
H05c	18	20	B24	15	15
H09	10	10	B25	15	18
H12	12	12	C04	12	12
H14	15	15	C08	18	20
I05 ²	10	10	C12	20	20
J06	30	30	C13	30	30
J11	30	30	C17	20	30
J17	30	30	C19	20	30
			F03c	18	20

De la misma forma, en la Tabla 5.7 se observa que, al no considerar el efecto de hacinamiento en la operación con itinerarios, se sobrestima en un 4% el costo total de operación. Este efecto no genera mayores cambios en el intervalo factible de operación, pero puede generar escenarios subóptimos de operación. De la misma forma, se observa que, para una operación con frecuencia, el efecto de hacinamiento sobreestima en un 4% el costo total de operación. Se concluye que, el efecto de un tiempo de viaje sensible al hacinamiento afecta de la misma forma en ambos modos de operación.

Tabla 5.9. Valores de P_v encontrados para el caso sensible al hacinamiento.

Servicio	P_v sensible	P_v constante
G02	\$ 3.071	
G07	\$ 2.638	
321	\$ 3.127	
350	\$ 3.128	
H02	\$ 3.129	
H04	\$ 2.819	
H05 ¹	\$ 2.836	
H05c	\$ 2.836	\$ 2.626
H09	\$ 2.782	
H12	\$ 2.831	
H14	\$ 2.973	
I05 ²	\$ 2.607	
J06	\$ 2.199	
J11	\$ 3.527	
J17	\$ 2.637	

Servicio	P_v sensible	P_v constante
B04v	\$ 2.942	
B10 ²	\$ 2.897	
B11	\$ 2.560	
B15	\$ 3.034	
B17	\$ 2.556	
B19 ¹	\$ 2.565	
B23	\$ 2.802	
B24	\$ 2.898	\$ 2.626
B25	\$ 2.804	
C04	\$ 2.713	
C08	\$ 2.872	
C12	\$ 3.046	
C13	\$ 2.542	
C17	\$ 3.128	
C19	\$ 2.630	
F03c	\$ 3.065	

(1): Costo mínimo observado para un tamaño de bus de 10 metros.

(2): Costo mínimo observado para un tamaño de bus de 12 metros.

En la Tabla 5.9 se exponen los valores del tiempo de viaje para los servicios en estudio encontrados en cada escenario. En ella se observa que un escenario con un valor del tiempo constante genera una subestimación del valor, así como de la frecuencia requerida para operar a un estándar mínimo de calidad, repercutiendo en una oferta menor (plazas/h) ofrecida y un encarecimiento del servicio ofrecido al usuario.

Concluyendo, se ha mostrado que la utilización de un valor del tiempo de viaje dependiente del hacinamiento es una parte importante a tener en cuenta al momento de determinar la frecuencia de operación óptima. Al considerar la tasa de ocupación en el valor del tiempo de viaje, se genera un aumento en la frecuencia de operación, especialmente en los servicios que poseen mayor demanda. Esto se debe a que en estos servicios el peso que posee el costo de viaje es mayor, en comparación a los servicios con menor demanda, justificando un incremento en los costos de operación (aumento de frecuencia) con el fin de reducir el efecto del hacinamiento.

5.2.2. Efecto de un T_w sensible al intervalo

La disposición de los usuarios del transporte público para programar sus llegadas al paradero depende, entre otras cosas, del intervalo de operación que ellos observan. Frecuencias más bajas y, por ende, intervalos entre expediciones más grandes provocan que el usuario se programe con mayor antelación (Sección 3.2.4), esto con el objetivo de minimizar el riesgo de perder un bus. Se ha visto que el tiempo de programación está relacionado a la confiabilidad y regularidad que el usuario observe en el sistema (Bowman, 1980). Esto debido a que el usuario internaliza la irregularidad de las llegadas en este tiempo, por lo que mejorar la regularidad de operación genera un aumento en la percepción de confiabilidad del usuario y a su vez, se refleja en una reducción del tiempo de programación.

Para analizar el efecto que tenga un tiempo de programación diferente en el costo total del servicio se crea un escenario, donde el tiempo de programación varía entre 7 minutos (para buses con un intervalo mayor a 15 minutos) y 9 minutos (para buses con un intervalo mayor a 15 minutos). Este supuesto se explica en el Capítulo 3, de acuerdo a lo observado mediante las encuestas PR. Este escenario se compara con 2 casos: el escenario ideal, donde los usuarios se programan con un tiempo de 4 minutos y el escenario base, donde los usuarios se programan de acuerdo a lo reportado en la Tabla 4.9.

En la Tabla 5.10 se presentan los resultados para los 3 escenarios antes descritos, se observa que en ninguno de los escenarios hubo un cambio en la frecuencia de operación. Esto se debe a que, en el modelo, el tiempo de programación depende casi exclusivamente de factores externos, no capturados por él, por lo que un aumento en el costo de espera no gatilla en un cambio de frecuencia del servicio.

Tabla 5.10. Resultados para el caso sensible al intervalo.

	Caso Tw ideal	Caso Tw base	Var.	Caso Tw ajustado	Var.
Costo Operacional	\$ 18.547.545	\$ 18.547.545	0%	\$ 15.547.545	0%
Costo de viaje	\$ 9.277.277	\$ 9.277.277	0%	\$ 9.277.277	0%
Costo de espera	\$ 10.228.543	\$ 13.419.849	31%	\$ 13.082.307	28%
Costo total	\$ 38.053.366	\$ 41.244.671	8%	\$ 40.907.129	8%

Ahora bien, el principal objetivo detrás de este análisis es concluir respecto a la influencia del tiempo de programación en el costo total y el resultado del ajuste utilizado en el Capítulo 3 para lograr capturar el efecto de la frecuencia en el tiempo de programación. En la Tabla 5.11 se exponen los tiempos de programación observados para los 3 escenarios, en donde se observa que el tiempo de programación calculado para el caso ajustado es semejante a lo declarado por los usuarios (Caso base). Aunque estos tiempos son bastante altos, en comparación con un escenario ideal de operación con itinerarios, reflejándose en el aumento de los costos de espera para los dos últimos escenarios.

Tabla 5.11. Tiempos de programación observados para el caso sensible al intervalo.

Servicio	Tiempo programación caso ideal [Min]	Tiempo programación caso base [Min]	Tiempo programación caso ajustado [Min]	Servicio	Tiempo programación caso ideal [Min]	Tiempo programación caso base [Min]	Tiempo programación caso ajustado [Min]
G02		6,3	9	B04v		8,4	9
G07		8,3	9	B10 ²		8,4	7
321		8,4	7	B11		8,4	9
350		8,4	7	B15		8,4	7
H02		8,4	7	B17		8,4	7
H04		8,4	9	B19 ¹		8,4	7
H05 ¹		8,4	7	B23		8,4	9
H05c	4	8,4	9	B24		8,4	9
H09		8,4	7	B25	4	8,4	9
H12		8,8	9	C04		8,4	7
H14		8,4	9	C08		5,7	9
I05 ²		8,4	7	C12		8,4	9
J06		8	9	C13		10	9
J11		8,5	9	C17		8,4	9
J17		10	9	C19		10	9
				F03c		8,4	9

(1): Costo mínimo observado para un tamaño de bus de 10 metros.

(2): Costo mínimo observado para un tamaño de bus de 12 metros.

Concluyendo, se ha mostrado que la utilización de un valor del tiempo de programación de los usuarios es una parte importante a tener en cuenta al momento de determinar los itinerarios factibles y el impacto que tiene una operación regular. Se destaca que existe un ahorro de un 8% en los costos totales de operación cuando el tiempo de programación de los usuarios baja a 4 minutos. Este efecto se puede lograr informado de manera activa al usuario, logrando una mejor utilización de su tiempo.

5.2.3. Efecto de una operación irregular

Un problema a los que se ven enfrentados los buses del sistema de transporte público es el alto nivel de congestión que deben enfrentar durante su operación. La congestión muchas veces es impredecible, causando variabilidad en los intervalos del sistema y generando un impacto en los costos tanto de usuarios, como de operadores. Para poder analizar el impacto que posee la regularidad de los intervalos en el costo total se crea un escenario con una regularidad perfecta ($\epsilon=0.5$).

De esta manera, en la Tabla 5.12 se muestran los costos calculados para cada escenario, en ella se observa que al considerar la irregularidad en la operación los costos de espera de los usuarios aumentan, producto de que la esperanza de su tiempo de espera aumenta. Este aumento en el tiempo de espera conlleva a incrementar la frecuencia (Tabla 5.13) con el fin de absorber las irregularidades causadas en la operación. Esto último conlleva a un mayor costo operacional y total del sistema.

Tabla 5.12. Resultados para el caso sensible a la regularidad de operación.

	Caso Irregular	Caso Regular	Var.
Costo Operacional	\$ 18.547.545	\$ 17.383.109	-6%
Costo de viaje	\$ 9.277.277	\$ 10.034.830	8%
Costo de espera	\$ 10.228.543	\$ 9.337.476	-9%
Costo total	\$ 38.053.366	\$ 36.775.416	-3%

Cabe destacar que se genera un aumento de costo de viaje del usuario por efecto de una reducción en la frecuencia del servicio. Esto es contrario a lo que ocurre en un escenario real, ya que la estimación no capta todo el efecto de una operación regular, dado que el programa supone que todos los buses poseen la misma ocupación. Esto último, solo es cierto en una operación y llegada de pasajeros perfectamente regular, pero en una operación irregular, la ocupación de los buses varía, lo que lleva a un hacinamiento promedio mayor, generando una subestimación del beneficio que genera, en el costo de viaje del usuario, una operación regular.

Tabla 5.13. Intervalos calculados para el caso sensible a la regularidad de operación.

Servicio	Intervalo Operación Irregular [Min]	Intervalo Operación Regular [Min]	Servicio	Intervalo Operación Irregular [Min]	Intervalo Operación Regular [Min]
G02	18	20	B04v	18	18
G07	12	12	B10	15	15
321	12	15	B11	12	12
350	12	15	B15	15	18
H02	15	15	B17	12	12
H04	15	20	B19	12	12
H05	10	10	B23	20	20
H05c	18	20	B24	15	15
H09	10	10	B25	15	18
H12	12	12	C04	12	12
H14	15	15	C08	18	18
I05	10	10	C12	20	20
J06	30	30	C13	30	30
J11	30	30	C17	20	30
J17	30	30	C19	20	30
			F03c	18	20

(1): Costo mínimo observado para un tamaño de bus de 10 metros.

(2): Costo mínimo observado para un tamaño de bus de 12 metros.

Concluyendo, se ha mostrado que la consideración de un escenario en donde la operación es perfectamente regular presenta beneficios. Realizar una operación regular para todos los servicios es difícil de llevar a la práctica, debido a los diversos factores que afectan en la operación diaria de bus. Por lo que generar mayores esfuerzos en este ámbito llevarían a mayores beneficios, pero el costo que tendría llevar a cabo una operación perfectamente regular es alto.

5.2.4. Efecto de una variación en el nivel de conocimiento

Una de las cosas que busca el presente trabajo es entender las condiciones favorables para operar servicios con itinerarios. Estos dos últimos análisis tienen relación con el impacto en el costo total para un servicio promedio del sistema. Para ello, se construye un servicio ficticio, representativo para los servicios en estudio, promediando los parámetros de estos, presentados en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14. Parámetros promedio de servicios en estudio.

Demanda Pasajeros [Pax/h]	Frecuencia Programada [Bus/h]	Largo de Ruta Ida [Km]	Largo de Ruta Retorno [Km]	Largo de Viaje [Km]	Velocidad Comercial [Km/h]	Coefficiente de Variación [-]
500	4,0	11,01	10,68	3,80	21	0,355

El escenario considera un tiempo de viaje sensible al hacinamiento y una variabilidad en los intervalos de operación. Se construyeron 3 escenarios para diferentes tiempos de programación, con el propósito de analizar el efecto para diferentes niveles de conocimiento en el costo total del servicio.

De esta manera, se procede a analizar el efecto que tienen diferentes niveles de conocimiento en los costos del sistema. Este análisis se realizará considerando 3 tiempos de programación diferentes: 4 minutos (ideal), 6 minutos y 8 minutos (observado).

Ilustración 5.10. Costo de operadores y usuarios a distintos niveles de conocimiento, para un tiempo de programación de 4 minutos.

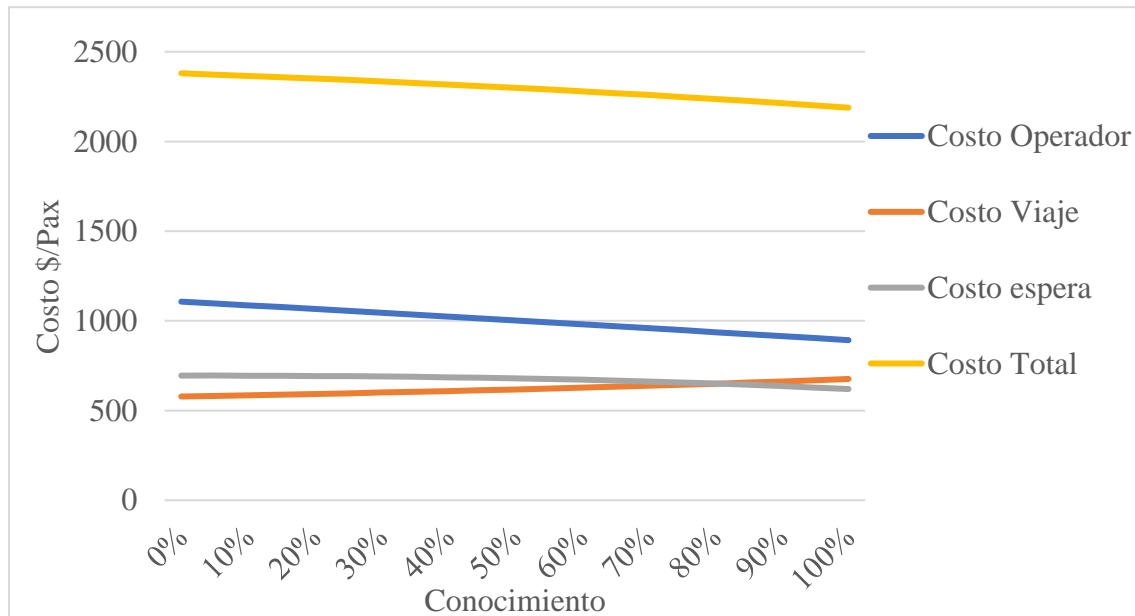


Ilustración 5.12. Costo de operadores y usuarios a distintos niveles de conocimiento, para un tiempo de programación de 6 minutos.

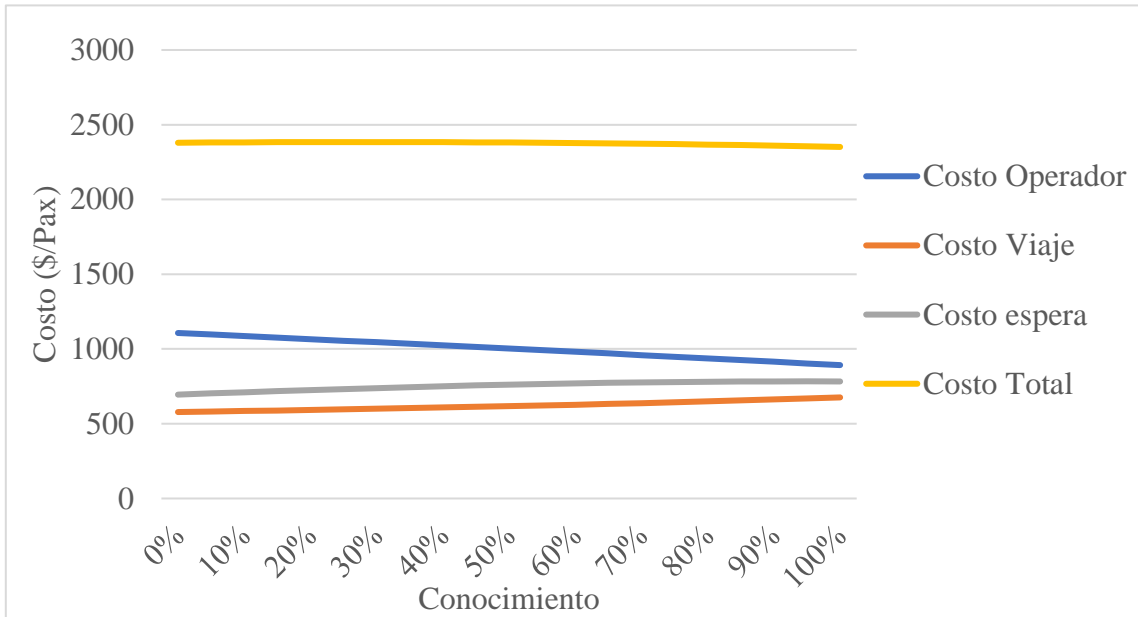
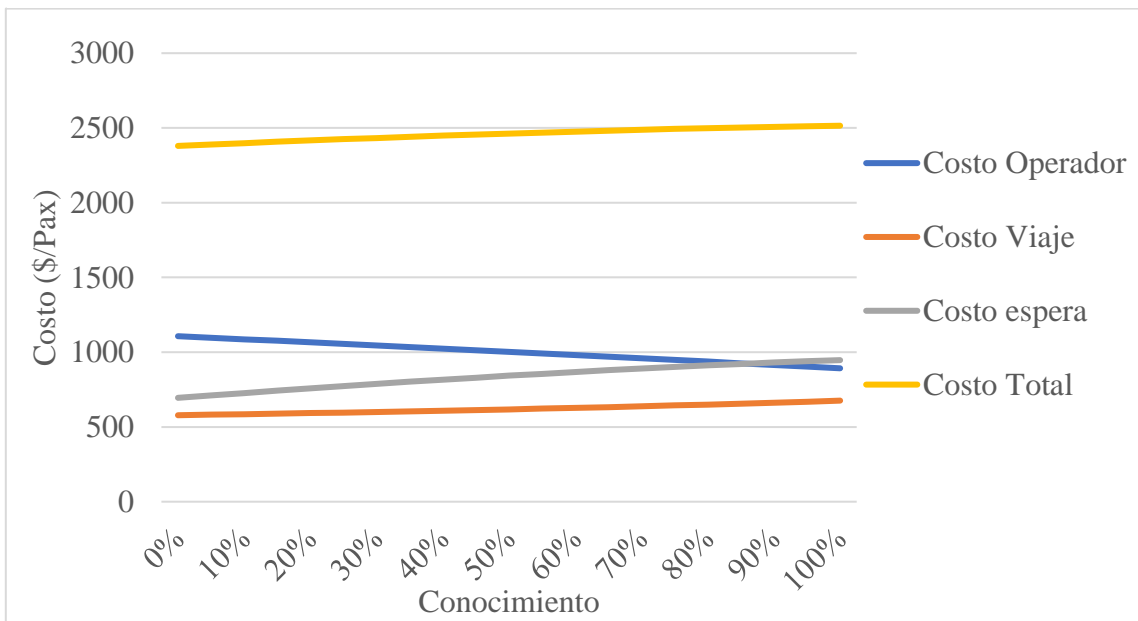


Ilustración 5.11. Costo de operadores y usuarios a distintos niveles de conocimiento, para un tiempo de programación de 8 minutos.



Concluyendo, se observa que el impacto que tiene el tiempo de programación en servicios operados con itinerarios es muy importante. Para los 3 escenarios se generan beneficios en los costos de operación, reduciendo en un 19% para el servicio ficticio en estudio al aumentar el nivel de conocimiento de la medida. Esto se debe a que un mayor nivel de conocimiento permite operar los recorridos de manera más eficiente desde el punto de vista del operador, reduciendo las frecuencias requeridas por el sistema. Pero el usuario, al programarse con mucho tiempo de holgura

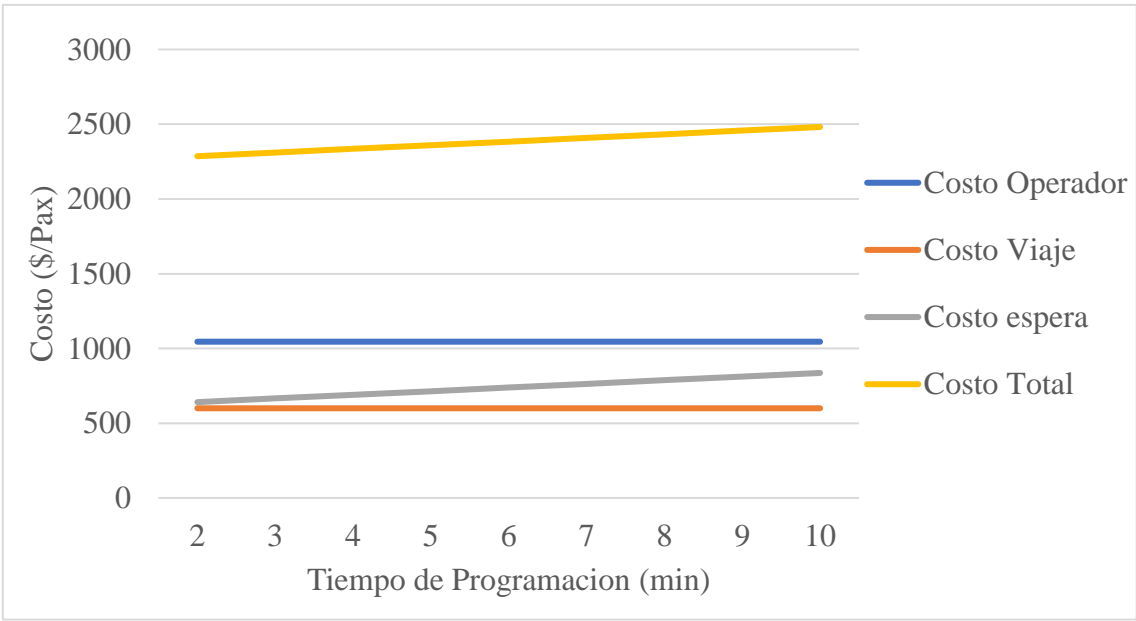
para llegar al paradero, se genera un aumento en el costo de tiempo de espera del usuario. Donde se observa (Ilustración 5.3) un aumento en los costos de espera de un 36% para un tiempo de programación de 8 minutos, generando un efecto contraproducente, volviendo más costosa la operación con itinerarios.

Por otra parte, para el primer caso, Ilustración 5.1, se observa una reducción en los costos de espera de un 11% para un tiempo de programación de 4 minutos, por lo que se concluye que es necesario informar correctamente a las personas, no solo que conozcan el itinerario, sino también que se programen de forma adecuada para lograr los beneficios esperados de una operación con itinerarios.

5.2.5. Efecto de una variación en el tiempo de programación

Como se mencionó anteriormente, para realizar el análisis del efecto en una variación del tiempo de programación se utilizó un escenario promedio de los servicios en estudio (Tabla 5.14). Dado un nivel ideal del conocimiento de los itinerarios (60%), se procede a calcular el costo total ante un tiempo de programación variable entre 2 y 10 minutos.

Ilustración 5.13. Costo de operadores y usuarios a distintos tiempos de programación.



En la ilustración 5.4 se observa un aumento en el costo de espera de un 30% y un aumento del costo total de operación de un 8,5% al aumentar el tiempo de programación de las personas. Esto lleva a una conclusión parecida a la anterior, en donde se observa que, si el usuario se programa con un tiempo mayor a 6 minutos, llevaría a generar desbeneficios en una operación con itinerarios. Cabe destacar que el costo de operación y de viaje se mantienen constantes debido a que el tiempo de programación no afecta en la frecuencia de operación.

5.3. Resumen optimización escenario actual de operación

En las secciones anteriores se han estudiado múltiples escenarios con el fin de determinar el efecto en el costo total y la variación en la frecuencia de operación que conlleva los efectos de hacinamiento, tiempo de programación sensible al intervalo observado, la regularidad de operación del servicio, el nivel de conocimiento del itinerario y el tiempo de programación del usuario, estimando el efecto que tiene cada una en el cálculo de la frecuencia de operación y en los costos totales del sistema.

Es importante destacar que el análisis que se desarrolló no es comparable en términos absolutos a los beneficios que se esperarían de una operación con itinerarios, debido a la amplificación en la demanda que se impone, pero si lo es en términos relativos. Esto da cuenta de la influencia que poseen los efectos estudiados en la operación de un sistema basados en itinerarios.

En la Tabla 5.15 se hace un análisis final entre la forma de operación vigente (servicios que operen con frecuencia y otros con itinerarios) y el escenario ideal de operación con itinerarios, de acuerdo a la metodología de comparación desarrollada. Para ambos escenarios se calcula su frecuencia óptima de operación, además, en ellos se encuentra el óptimo para un tamaño de buses de 8 metros. Se presenta la estructura de costos en los que incurre el operador y el usuario, además, se estima la incidencia, razón entre el costo observado y el costo total, de cada ítem en la estructura de costos del sistema, para el escenario óptimo.

Tabla 5.15. Comparación de costos para el escenario óptimo de frecuencia e itinerario.

Estructura de costos	Escenario Frecuencia Óptima	Escenario Itinerario Óptimo	Var.	Incidencia Frecuencia Óptima	Incidencia Itinerario Óptimo
Costo total	\$ 18.662.297	\$ 16.907.439	-9%		
Costo tiempo de espera	\$ 6.829.780	\$ 5.202.857	-24%	37%	31%
Costo tiempo de viaje	\$ 2.632.603	\$ 2.662.844	1%	14%	16%
Costo de usuarios	\$ 9.462.383	\$ 7.865.701	-17%	51%	47%
Costo capital	\$ 1.210.972	\$ 1.188.465	-2%	6%	7%
Costo tripulación	\$ 3.483.587	\$ 3.418.841	-2%	19%	20%
Costo operacional	\$ 2.522.999	\$ 2.483.282	-2%	14%	15%
Costo administración	\$ 1.982.356	\$ 1.951.150	-2%	11%	12%
Costo operador	\$ 9.199.914	\$ 9.041.738	-2%	49%	53%

En primer lugar, se observa que para una operación de los 31 servicios en estudio con itinerarios la mayor parte de los beneficios se encuentra en los costos de espera del usuario. Este costo presenta la mayor variación observada, además, es el que tiene mayor incidencia en los costos totales para el escenario en estudio, por lo que operar los servicios con itinerarios genera una reducción una reducción de un 24% en el costo del tiempo de espera de los usuarios. Esto último, justifica realizar un trabajo activo en informar a los usuarios con el fin de elevar el

nivel de conocimiento de los itinerarios y reducir el tiempo de programación, con el fin de llevar la situación actual, a una ideal de operación y obtener la mayor cantidad de beneficios de este modo de operación.

Tabla 5.16. Intervalos calculados para el escenario óptimo de frecuencia e itinerario.

Servicio	Intervalo Frecuencia Óptimo [Min]	Intervalo Itinerario Óptimo [Min]	Servicio	Intervalo Frecuencia Óptimo [Min]	Intervalo Itinerario Óptimo [Min]
G02	30	30	B04v	30	30
G07	30	30	B10	20	20
321	30	30	B11	30	30
350	30	30	B15	30	30
H02	30	30	B17	30	30
H04	30	30	B19	30	30
H05	20	30	B23	30	30
H05c	30	30	B24	30	30
H09	30	30	B25	30	30
H12	30	30	C04	30	30
H14	30	30	C08	30	30
I05	15	15	C12	30	30
J06	30	30	C13	30	30
J11	30	30	C17	30	30
J17	30	30	C19	30	30
			F03c	30	30

En la Tabla 5.16 se presentan los intervalos óptimos de cada escenario, en ella se observa que la variación de frecuencias es baja, por lo que el beneficio de una operación con itinerarios radica en la reducción de los costos que incurre el usuario al momento de realizar su viaje. Esto se explica debido a que el usuario reduce su tiempo de espera, apoyando lo concluido en la sección anterior.

De esta forma, aun cuando probablemente no habrá una repercusión mayor en los costos totales del operador ante un cambio en la forma de operación, sí podrían reducirse los tiempos de los usuarios, y por ende, los costos totales del sistema. Lo cual podría ser valorado positivamente por ellos, mejorando la calidad y confiabilidad en el sistema. Esto último influiría positivamente atrayendo demanda los servicios que presentan itinerarios. Cualquiera sea el caso se deberá tener precaución con no introducir demasiadas diferencias en la red sin informar adecuadamente a los usuarios. Esto porque podría generar algunas dificultades en el horario de transición y principalmente porque de no informarse adecuadamente solo conseguirá desorientar a los usuarios y empobrecer el servicio entregado.

Capítulo 6

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

En el presente trabajo de investigación se han sido estudiados los factores que inciden en el costo de los operadores y usuarios para 31 servicios de baja demanda del sistema de transporte público de Santiago de Chile, Transantiago. Con el objetivo de estudiar la influencia que tienen los diferentes factores en el costo total se desarrolló un modelo microeconómico para la búsqueda de la frecuencia de operación que minimiza los costos totales del sistema, para un itinerario factible de operación.

Para analizar correctamente el impacto de estos efectos es fundamental incorporar adecuadamente los costos de usuarios y operadores, ya que una de las principales motivaciones del trabajo es conocer el impacto que tienen estos factores en los costos anteriores. Específicamente, los costos incorporados al modelo incluyen el costo de capital, tripulación, operacional y otros costos de administración por el lado de los operadores, mientras que para los usuarios se incluyen los costos asociados al tiempo de viaje y espera, además de utilizar un valor del tiempo de viaje sensible a la ocupación del bus. Para la formulación del modelo las variables fueron abordadas para cinco periodos del día, todos ellos fuera de punta. En la cual el estudio de los escenarios se realizó para un promedio de estos 5 periodos.

A partir de lo anterior, es posible determinar los impactos de variables que afectan el costo total para servicios de buses basados en itinerarios a partir de escenarios comparativos utilizando un modelo microeconómico. Para ello, se construye un caso base de comparación, el cual representa un escenario ideal de operación con itinerario para una demanda amplificada. Este último producto de que las demandas actuales del sistema son insuficientes para poder desarrollar una metodología apropiada de comparación.

Posteriormente, se realizó un análisis de sensibilidad para diferentes variables explicativas (hacinamiento, tiempo de programación, nivel de conocimiento y regularidad), determinando si contribuyen a aumentar o disminuir el costo de proveer el servicio, y a su vez, determinar el intervalo resultante de dicho análisis.

Finalmente, se compara un escenario óptimo de operación con frecuencia, con un escenario óptimo de operación con itinerarios, para la demanda actual del sistema. Determinando las circunstancias para que sea conveniente operar los servicios en estudio con intervalos fijos de pasada y estimando los beneficios de este modo de operación.

Para ello, fueron utilizados datos correspondientes a la semana laboral del 9 al 13 de abril de 2018, estos contienen información de la cantidad de pasajeros que suben en cada paradero, de cada servicio, la cual está sujeta a que la persona realice el pago del pasaje con su tarjeta Bip. Además,

existen datos de la operación del sistema, obtenida gracias a los dispositivos GPS instalados en cada bus. Por otra parte, con el fin de comprender el comportamiento del usuario ante servicios operados con itinerarios se realizó encuestas de preferencias reveladas a 9 servicios de Transantiago que actualmente operan con itinerarios.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo son de gran utilidad para mejorar la operación de Transantiago, ya que en Chile son pocos los estudios relacionados a una operación de una línea de buses con itinerarios para servicios reales. Estos permiten realizar un diseño táctico y operacional eficiente, buscando reducir, no solo los costos de operación, sino también el tiempo empleado por el usuario. Es más, este es el primer estudio que, utilizando datos reales, estima los costos del sistema y estudia las variables que los afectan. Esto permite obtener una idea más real de cómo se deben gestionar estos servicios para obtener los mayores beneficios, especialmente ahora que se encuentran en fase de implementación.

Uno de los principales resultados encontrados en el trabajo fue la respuesta que tuvo el análisis de la situación actual de operación. Líneas servidas con baja demanda, indican que su frecuencia óptima de operación, la cual minimiza los costos totales, se encuentra en la mínima frecuencia impuesta por el modelo (2 buses/h) para la mayoría de las líneas. Esto indica que los servicios actualmente están operando ante un estándar mínimo de calidad, lo que se ve reflejado en el bajo costo que el usuario percibe en comparación al costo de operación. Así, se concluye que el sistema vigente de operación de Transantiago tiene espacio para mejorar, ofreciendo un mejor servicio y a un menor costo.

Otro resultado interesante tiene relación con la importancia de considerar los efectos del hacinamiento y la variabilidad del servicio para estimar correctamente los costos percibidos por los usuarios. En el escenario en que se fija un valor del tiempo de viaje del usuario constante, se da cuenta de cómo se pueden subestimar los costos de viaje percibidos por los usuarios. Mientras que en el escenario que analiza los efectos de una operación no regular, se observa que no considerar la irregularidad del servicio llevaría a subestimar el costo de espera de los usuarios. En ambos casos el costo asociado al operador es menor al momento de no considerar estos efectos producto de que se requiere una menor frecuencia de operación, esto podría ser un caso idóneo cuando se buscan reducir los costos privados del sistema, pero no considerar estos impactos podría llevar a situaciones socialmente menos eficientes, reduciendo la calidad, seguridad y confianza que el usuario percibe del sistema y afectando incluso la demanda en el sistema.

Respecto a los resultados de los escenarios que muestran el efecto ante un cambio del nivel de conocimiento de la medida y el tiempo de programación, estos se relacionan directamente con el costo de tiempo de espera de los usuarios. Ellos indican que una persona que conoce el itinerario y programa su llegada al paradero de manera correcta genera la forma más efectiva de reducir los costos para esta forma de operación. A su vez, un usuario que se programa con mucho tiempo de antelación conlleva a que la operación con itinerarios sea un 8,5% más costosa que la operación con frecuencia. Por lo que se recomienda informar correctamente a las personas, no solo que conozcan el itinerario, sino también que se programen de forma adecuada para lograr los beneficios esperados de la medida.

Analizando la comparación entre un escenario óptimo operado con frecuencia y un escenario óptimo operado con itinerarios, se observa que los usuarios percibirían una reducción en su costo de espera de un 24%, considerando casos ideales de operación. Es decir, un escenario en donde las personas se programen con 4 minutos antes de la llegada del servicio y exista un 60% de los usuarios que conozcan y programen su llegada al paradero acorde al itinerario de pasada del

recorrido. Además, al operar los servicios en este escenario genera una reducción del 2% de los costos en los cuales incurre el operador, debido a una disminución en la frecuencia de algunos servicios. En conclusión, se observa que el modo de operación con itinerarios reduciría un 9% los costos totales del sistema, evidenciándose los beneficios sociales que conlleva esta medida.

Finalmente, y en relación con la aplicabilidad de lo concluido en este trabajo, sería deseable poder contar con una metodología que permita sugerir servicios para la operación con itinerarios, en donde se estudien líneas de baja demanda, analizando las variables descritas e identificando cuales están operando de manera deficiente. De esta forma, mejorar la operación informando a usuarios de cómo deben utilizar este servicio, informando en los paraderos los intervalos de pasada y utilizando medidas tecnológicas que permitan hacer un uso correcto y eficiente del sistema.

6.2. Limitaciones del trabajo y líneas futuras de investigación.

El resultado del trabajo de investigación permite identificar una serie de aspectos que no fueron tratados en el desarrollo de este trabajo, con el objetivo de encontrar el beneficio completo que existiría al extender la estimación incluyendo variables como la seguridad, percepción de calidad y confiabilidad en el sistema.

Se requiere ingresar servicios nocturnos al estudio, con el propósito de analizar el beneficio que tendría una operación con itinerarios. Para cuantificar correctamente estos beneficios es necesario entender el efecto que tienen las variables antes descritas en la atracción de demanda y costos totales. También, estudiar la factibilidad para aplicar esta forma de operación en periodos punta, realizando un modelo multi periodo, sirviendo de mejor manera la demanda existente y reduciendo los tiempos del usuario en el sistema.

Con respecto a la realización de las encuestas, se debe investigar la posibilidad de incluir una herramienta muy útil, como lo son las encuestas online a través de aplicaciones en teléfonos móviles de los mismos usuarios, en metodologías futuras de obtención de datos de los usuarios, producto de la facilidad, bajo costo y potencial que presentan en el desarrollo de estudios.

También se hace necesario analizar el efecto de transbordos entre líneas servidas con itinerarios, pensando en un modelo de máximas sincronizaciones, maximizando los transbordos o reduciendo el tiempo de transbordar.

Finalmente, se observa la necesidad de estudiar con mayor profundidad el efecto que posee el nivel de conocimiento que poseen los usuarios, pues en la práctica, el desconocimiento es un problema que enfrentan los usuarios y es un punto importante para obtener los beneficios esperados. Así también, determinar las variables que afectan el nivel de conocimiento que se requiere para tener una reducción de costos respecto a una operación basada en frecuencia.

Bibliografía

- Abkowitz, M. D. (1978). Transit service reliability. Reporte UMTA-MA-06-0049-78-1. U.S. Department of Transportation Systems Center, Cambridge, Mass.
- Arriagada, J. (2016). *Modelamiento del fenómeno apalotonamiento de buses* (Tesis de Magister en Gestión de Operaciones). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago de Chile.
- Batarce, M., J. C. Muñoz, J. de Dios Ortúzar, S. Raveau, C. Mojica y R. A. Ríos (2015). Use of mixed stated and revealed preference data for crowding valuation on public transport in santiago, chile. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2535), 73–78.
- Bowman, L. A. y Turnquist, M. A. (1981). Service frequency, schedule reliability and passenger wait times at transit stops. *Transportation Research A: General*, 15(6), 465-471.
- Ceder, A. (1984). Bus frequency determination using passenger count data. *Transportation Research*, 18A (5/6), 439–453.
- Ceder, A. (1986). Methods for creating bus timetables. *Transportation Research*, 21A(1), 59–83.
- Cortes, C. E., Gibson, J., Gschwender, A., Munizaga, M., y Zuniga, M. (2011). Commercial bus speed diagnosis based on GPS-monitored data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(4):695-707.
- Diab, E., Badami, M. y El-Geneidy, A. (2015). Bus transit service reliability and improvement strategies: Integrating the perspectives of passengers and transit agencies in North America. *Transport Reviews*, 23(3), 292-328.
- DTPM. (2013). Estudio para la actualización de la estructura de costos y evaluación del equilibrio económico de los contratos de operadores de vías del sistema de transporte público de santiago mediante buses. informe elaborado por xlibrium.
- DTPM (2018). Ranking calidad de servicio de empresas concesionarias de Transantiago. Recuperado de <http://www.dtpm.cl/index.php/documentos/ranking-calidad-de-servicio>.
- DTPM. (2018). Programa de operación primer semestre de 2018. Recuperado de <http://www.dtpm.cl/index.php/planes-operacionales-historicos/programas-de-operacion-primer-semester-de-2018-vigente-entre-el-13-01-2018-y-30-06-2018>.
- DTPM. (2018). Indicadores de operación. Recuperado de <http://www.dtpm.cl/index.php/indicadores-de-operacion>.

- DTPM. (2018). Beneficios itinerarios, Documento Técnico.
- Durán, E. (2016). *Caracterización de la variabilidad del tiempo de viaje en la ciudad de Santiago* (Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Transporte). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago de Chile.
- El-Geneidy, A., Horning, J. y Krizek, K. (2011). Analyzing transit service reliability using detailed data from automatic vehicular locator systems. *Journal of Advanced Transportation*, 45 (1), 66-79.
- Espinoza, D. (2017). *Condiciones para operar una línea de bus con frecuencia similar en periodos punta y fuera de punta* (Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago de Chile.
- Godachevich, J. (2017). *Modelación de variables que afectan la regularidad en el despacho de buses*. (Memoria en Ciencias de la Ingeniería). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago de Chile.
- Hurdle, V. F. (1973). Minimum cost schedules for a public transportation route. *Transportation Science*, 7(2), 109–157.
- Jansson, J. O. (1980). A simple bus line model for optimisation of service frequency and bus size. *Journal of Transport Economics and Policy*, 53–80.
- Jansson, J. O. (1984). *Transport System Optimization and Pricing*. (Chichester: Wiley).
- Jara-Díaz, S. y A. Gschwender (2003b). Towards a general microeconomic model for the operation of public transport. *Transport Reviews* 23 (4), 453–469.
- Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. (2012). Contrato ad-referéndum de concesión de uso de vías para la prestación de servicios de transporte público urbano remunerado de pasajeros mediante buses entre Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones y Subus Chile S.A., Anexo 6: Aseguramiento de la calidad en la ejecución de los servicios.
- Mohring, H. (1972). Optimization and scale economies in urban bus transportation. *The American Economic Review* 62 (4), 591–604.
- Mohring, H., (1976). *Transportation Economics* (Cambridge, MA:Ballinger).
- Moreira-Matias, L., Ferreira, C., Gama, J., Mendes-Moreira, J., y de Sousa, J. F. (2012). Bus bunching detection by mining sequences of headway deviations. En *Advances in Data Mining. Applications and Theoretical Aspects*, pp. 77-91. Springer Berlin Heidelberg.
- Munizaga, M. A. y Palma, C. (2012). Estimation of a disaggregate multimodal public transport origin–destination matrix from passive smartcard data from Santiago, Chile. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 24:9–18.
- Newell, G. F. (1971). Dispatching policies for a transportation route. *Transportation Science*, 5, 91–105.

- Peek, G. J. y Van Hagen, M. (2002). Creating synergy in and around stations: Three strategies for adding value. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1793, 1-6.
- Salzborn, F. J. M. (1972). Optimum bus scheduling. *Transportation Science*, 6, 137–148.
- Strathman, J. G., Kimpel, T., Dueker, K., Gerhart, R. L. y Callas, S. (2001). Bus transit operations control: Review and an experiment involving tri-met's automated bus dispatching system. *Journal of Public Transportation*, 4, 1-26.
- Strathman, J. G. y Kimpel, T. J. (2003). Headway deviation effects on bus passenger loads: Analysis of tri-met's archived AVL-APC data. Technical report, Portland State University Center for Urban Studies, No. PR126.
- Tirachini, A., D. A. Hensher y S. R. Jara-Díaz (2010). Restating modal investment priority with an improved model for public transport analysis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 46 (6), 1148–1168.
- Tirachini, A., D. A. Hensher y J. M. Rose (2013). Crowding in public transport systems: effects on users, operation and implications for the estimation of demand. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 53, 36–52.
- Tirachini, A., L. Camus y D. Cruz (2015). Modelación de tiempos de detención de buses en paraderos de santiago y valparaíso-viña del mar. *Ingeniería de Transporte* 19 (2), 103–116.
- Vickrey, W. (1955). Some implications of marginal cost pricing for public utilities. *The American Economic Review* 45 (2), 605–620.
- Whelan, G., Crockett, J (2009). An investigation of the willingness to pay to reduce rail overcrowding. In: International Conference on Choice Modelling, Harrogate, England, April.
- Wardman, M. y G. Whelan (2011). Twenty years of rail crowding valuation studies: evidence and lessons from british experience. *Transport reviews* 31 (3), 379–398.

Anexo A

Código utilizado para el cálculo del modelo matemático.

```
disp(['Inicio Lectura'])
tic;
% solve with interior-point alg
options = optimoptions(@fmincon,'Algorithm','interior-point','Display','off');
BUS = 1; % bus tipo 1 (8m) - bus tipo 2 (10 m) - bus tipo 3 (12m)

% linear constraints
A = [];
B = [];
Aeq = [];
Beq = [];

% non linear constraints
nlc = [];

% variable bounds
lb = 2.0;
ub = 6.0;

% inicial point
Frecuencia = xlsread('Parametros Modelo','Datos','i2:i33');

% fixed parameters
C0 = [15302, 21423, 33664]; % Costo diario para un bus del tipo i $(bus - dia)
C1 = [4622, 4622, 4622]; % Costo del operario por hora $/h
C2 = [206, 265, 308]; % Costo del bus i por hora operada $(bus h km)
m = [8.333, 10, 15]; % Metros cuadrados segun bus i
Pw = 4903; % Valor del Tiempo de espera $/h
x = 2.4/3600; % Tiempo de subida y bajada por pasajero h/pax, 2.4seconds
d = 10; % Periodo de analisis h
u = 1/3; % Relación de ahorro por espera en el hogar
Nu = 1.05; %Flota de reserva

%bus parameters
C0=C0(BUS);
C1=C1(BUS);
C2=C2(BUS);
m=m(BUS);

% line dependant parameters
[num,txt,Servicios]=xlsread('Parametros Modelo','Datos','c2:c33'); %servicios
estudiados
tw = xlsread('Parametros Modelo','Datos','o2:o33'); % Tiempo de seguridad h
v = xlsread('Parametros Modelo','Datos','m2:m33'); % Velocidad comercial de los buses
km/h
l1 = xlsread('Parametros Modelo','Datos','k2:k33'); % Distancia ida de un ciclo Km
l2 = xlsread('Parametros Modelo','Datos','l2:l33'); % Distancia vuelta de un ciclo Km
l = xlsread('Parametros Modelo','Datos','h2:h33'); % Distancia recorrida en promedio
por usuario Km#
a = xlsread('Parametros Modelo','Datos','n2:n33'); % Porcentaje de pasajeros que
conoce la medida
%a = zeros(length(Servicios),1); % Para Frecuencia, 0% conoce la medida
e = xlsread('Parametros Modelo','Datos','g2:g33'); % Desviacion estandar del tiempo de
espera
```

```

yaux = xlsread('Parametros Modelo','Datos','f2:f33'); % Demanda de pasajeros pax/h
fut = xlsread('Parametros Modelo','Datos','t2:t33'); %f utilizada.
Oc=xlsread('Parametros Modelo','Datos','r2:r33'); % Porcentaje de pasajeros que viaja
en la seccion mas cargada
y1=yaux; %amplificador de demanda
y2=yaux*2; %amplificador de demanda
y3=yaux*3; %amplificador de demanda
y4=yaux*4; %amplificador de demanda
y5=yaux*5; %amplificador de demanda

disp(['Lectura Lista, Inicio de Optimizacion'])

Frecuenciabase=zeros(length(Servicios),1);
CostoTotalbase=zeros(length(Servicios),1);
CostoPaxbase=zeros(length(Servicios),1);
CostoOperadorbase0=zeros(length(Servicios),1);
CostoOperadorbase1=zeros(length(Servicios),1);
CostoOperadorbase2=zeros(length(Servicios),1);
CostoViajebase=zeros(length(Servicios),1);
CostoEsperabase=zeros(length(Servicios),1);

fimp= [60/30,60/20,60/18,60/15,60/12,60/10];
%optimizador
for i=1:length(Servicios)
    twi=tw(i)/60;
    vi=v(i);
    l1i=l1(i);
    l2i=l2(i);
    li=l(i);
    ai=a(i);
    ei=e(i);
    yi=y3(i);
    x0i=Frecuencia(i);
    fun = @(f)C0*Nu*f(1)*((yi/f(1))*x+(l1i+l2i)/vi)+C1*d*f(1)*((yi/f(1))*x+(l1i+l2i)
/vi)+(C2*d*vi*f(1)*((yi/f(1))*x+(l1i+l2i)/vi))*(1+0.44)+(2158+77.77*((li*yi)/(m*
(l1i+l2i)*f(1)))+94.09*((li*yi)/(m*(l1i+l2i)*f(1)))*((li*yi)/(m*(l1i+l2i)*f(1)))))*
(li/(l1i+l2i))*((yi/f(1))*x+(l1i+l2i)/vi)*yi+Pw*yi*(ai*(twi+(u*ei)/(2*f(1)))+((1-
ai)*ei)/(2*f(1))));
    Cop0 = @(f)C0*Nu*f(1)*((yi/f(1))*x+(l1i+l2i)/vi);
    Cop1 = @(f)C1*d*f(1)*((yi/f(1))*x+(l1i+l2i)/vi);
    Cop2 = @(f)(C2*d*vi*f(1)*((yi/f(1))*x+(l1i+l2i)/vi))*(1+0.44);
    Ctv = @(f)(2158+77.77*((li*yi)/(m*(l1i+l2i)*f(1)))+94.09*((li*yi)/(m*(l1i+l2i)*f
(1)))*((li*yi)/(m*(l1i+l2i)*f(1))))*li/(l1i+l2i)*((yi/f(1))*x+(l1i+l2i)/vi)*yi;
    Cte = @(f)Pw*yi*(ai*(twi+(u*ei)/(2*f(1)))+((1-ai)*ei)/(2*f(1))));

    lbaux=[2,(Oc*yi)/(0.9*m*6)];%frecuencia minima
    lb=max(lbaux);

    %f = fmincon(fun,x0i,A,B,Aeq,Beq,lb,ub,nlc,options); %optimizador
    CTFUN=zeros(length(fimp),1);
    for n=1:length(fimp);
        ayuda=fimp(n);
        CTFUN(n)=fun(ayuda);
    end

```

```

b=min(CTFUN);
c=find(CTFUN==b);
f=max(fut(i),lb);

Frecuenciabase(i)=f;
CostoTotalbase(i)=fun(f);
CostoPaxbase(i)=fun(f)/yi;
CostoOperadorbase0(i)=Cop0(f)/yi;
CostoOperadorbase1(i)=Cop1(f)/yi;
CostoOperadorbase2(i)=Cop2(f)/yi;
CostoViajebase(i)=Ctv(f)/yi;
CostoEsperabase(i)=Cte(f)/yi;

end

%Guardar Datos en Excel
T=table(Servicios,Frecuenciabase,CostoTotalbase,CostoPaxbase,CostoOperadorbase0,
CostoOperadorbase1,CostoOperadorbase2,CostoViajebase,CostoEsperabase,tw,a,y3,e,l,l1,
l2,v);
filename = 'C:\Users\Hans-Pc\Dropbox\Ramos\Trabajo de Titulo\Hans\ZVersion
Final\Resultados\Resultados Optimizador Final Optimo.xlsx'; %Archivo de Guardado
writetable(T,filename,'Sheet',1);

disp(['Optimizacion Lista, Resultados en ' filename])
toc

```

Figura A.1. Código para cálculo del modelo matemático.

Anexo B

Código utilizado para cálculo de intervalo entre expediciones y coeficiente de variación del servicio.

```
23
24 # Funcion de calculo de intervalo
25 def variabilidad(ruta, paradero):
26     servicio=ruta
27     conexion=psycopg2.connect(dbname="Viajes", user="postgres", password="", host="localhost", port="5432") # se crea la conexión
28     cursor=conexion.cursor()
29
30     cursor.execute(""" select serviciosentido, tiempo::time, hini::date from estudiosperalaboral2017
31                       where paradero=%s and serviciosentido like %s
32                       order by hini::date, tiempo::time;""", (paradero, servicio))
33
34     perfiles = cursor.fetchall()
35     headway=[]
36     contador=0
37     tiempo_anterior=''
38     fecha_anterior=''
39     for row in perfiles:
40         serviciop=row[0]
41         tiempo=row[1]
42         fechap=row[2]
43         intervalo=''
44         if serviciop==ruta:
45             if contador==0:
46                 tiempo_anterior=tiempop
47                 fecha_anterior=fechap
48                 contador+=1
49             else:
50
51                 if fechap==fecha_anterior and tiempo !=None and tiempo_anterior !=None:
52                     intervalo=datetime.combine(date.min, tiempo) - datetime.combine(date.min, tiempo_anterior)
53
54                     if intervalo.seconds < 3000:
55                         headway.append(intervalo.seconds)% 3600 / 60)
56                         tiempo_anterior=tiempop
57                         fecha_anterior=fechap
58
59                     else:
60                         tiempo_anterior=tiempop
61                         fecha_anterior=fechap
62
63                 else:
64                     tiempo_anterior=tiempop
65                     fecha_anterior=fechap
66
67     if len(headway)<2:
68         print(paradero, servicio, ruta)
69         CV=-100
70         return 0, 0, 0, ruta, paradero#, 0, 0
71
72     else:
73         desv=statistics.stdev(headway)
74         avg=sum(headway)/len(headway)
75         CV=desv/avg
76         return desv, avg, CV, ruta, paradero#, headway, intervalo
```

Figura B.1. Código para cálculo de intervalo entre expediciones y coeficiente de variación del servicio

```

78 #Genera el dataframe y lo guarda en excel
79
80 instanteInicial = datetime.now() # tiempo partida
81 excel=pd.read_excel('C:\Users\Hans-Pc\Dropbox\Ramos\Trabajo de Titulo\Hans\Programacion\Base de Datos\IndexServicioParadero2017.xlsx');
82 rutas=excel['serviciosentido'];
83 paraderos=excel['paradero'];
84 resultados=[];
85
86 i=0;
87 while i != len(rutas): #recorre las rutas y obtiene resultados
88     resultados.append(variabilidad(rutas[i],paraderos[i]))
89     i+=1
90
91 desvs=[];
92 avg=[];
93 cv=[];
94 ruta=[];
95 paradero=[];
96
97 k=0;
98 i=0;
99 while i != len(resultados): #separa los resultados en listas para crear dataframe
100     auxiliar=resultados[i]
101     desvs.append(auxiliar[k])
102     avg.append(auxiliar[k+1])
103     cv.append(auxiliar[k+2])
104     ruta.append(auxiliar[k+3])
105     paradero.append(auxiliar[k+4])
106     i+=1
107
108 df=pd.DataFrame({'desv': desvs, 'avg': avg, 'cv': cv, 'ruta': ruta, 'paradero': paradero}): #crea dataframe con variables
109
110 #print(df)
111 filenamewriter=('C:\Users\Hans-Pc\Dropbox\Ramos\Trabajo de Titulo\Hans\Programacion\Base de Datos\Espera Resultados\EsperaSlaboral2017.xlsx')
112 writer = ExcelWriter(filenamewriter) #funcion para generar excel
113 df.to_excel(writer, 'Hoja de datos', index=False)
114 writer.save()
115
116 instanteFinal = datetime.now() #tiempo fin
117 tiempo = instanteFinal - instanteInicial #contador
118
119 print('Resultados en :', filenamewriter)
120 print('Tiempo empleado:', tiempo.seconds, '[s]')
121
122

```

Figura B.2. Código para generar visualizador de datos y generación de archivo Excel

Anexo C

Encuesta piloto

Encuesta Memoria		Año							
				2	0	1	8		
CONTACTE HOMBRES Y MUJERES DE 15 AÑOS O MÁS									
Buenos días/ tardes, Memorista de la Universidad de Chile está evaluando su servicio y nos gustaría conocer su opinión. ¿Le podría hacer unas breves preguntas? SÓLO SI PREGUNTA: Todas las respuestas serán confidenciales.									
FILTRO									
F1	En los últimos 3 meses, ¿Usted recuerda haber usado el recorrido...?	Sí	1					CIERRE	
		No	2						
CUESTIONARIO									
EXPERIENCIA CON SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO									
P1	De 1 a 7, en general, ¿Con qué nota evalúa...LEER FRASES SIN ROTAR? RU								
P1a	El sistema de transporte público de Santiago	1	2	3	4	5	6	7	9 [NS/NR]
P1b	Al recorrido: ...	1	2	3	4	5	6	7	9 [NS/NR]
P2	¿Por qué razón evalúa al recorrido... con nota LEER NOTA SEGÚN P1a? P1b? REGISTRE TEXTUAL.								
HÁBITOS Y SERVICIO									
P3	¿Con qué frecuencia usa el recorrido ...? RU	Todos los días Todas las semanas Todos los meses Con menor frecuencia NS/NR						1 2 3 4 99	
P4	Cuando usa el servicio ..., ¿lo hace en días de semana, fines de semana o ambos? RU	Días de semana Fin de semana Ambos						1 2 3	

		Horario	Día de Semana	Sábado/ Domingo	
P5	¿Y en qué horarios usa el recorrido ...? RM	Punta mañana: 06:00 a 08:59 Valle AM: 09:00 a 12:29 Valle PM: 12:30 a 17:59 Punta tarde: 18:00 a 19:59 Valle Noche: 20:00 a 23:59 Nocturno: 00:00 a 05:59	1 2 3 4 5 6	1 2 3 4 5 6	
P6	¿Sabía que este recorrido tiene horarios establecidos de pasada?		SI NO	1 2	SIGA PASE A P13
P7	SÓLO SI P6 =1 ¿Cómo supo que tiene horarios establecidos? RM		Conductor Página web de Transantiago Algún familiar o conocido Información en la parada (letrero) Me di cuenta al usarlo Monitor Informativo/volante Otros ¿Cuál? _____	1 2 3 4 5 6 7	
P8	SÓLO SI P6 =1 ¿Usted programa su hora de llegada al paradero según el horario de pasada del bus? ¿Cuántos minutos se programa? RU		SI NO Minutos ¿Cuántos? _____	1 2	
P9	SÓLO SI P6 =1 ¿Usted usaba esta línea antes de saber que los horarios de pasada son establecidos? RU		SI NO	1 2	
P10	SÓLO SI P6 =1 Según su experiencia, los buses del recorrido...: ¿Cumplen...LEER OPCIONES?		Siempre o casi siempre cumple el horario A veces cumplen el horario Muy pocas veces cumplen el horario	1 2 3	PASE A P12 SIGA SIGA
P11	SÓLO SI P6 =1 Cuando no cumplen el horario, ¿por cuántos minutos se demora aproximadamente?		Minutos ¿Cuántos? _____ No sabe	99	
P12	SÓLO SI P6 =1 ¿Cuánto valora que existan recorridos con horarios de parada establecidos (o fijos)? RU Si dice que lo valora → ¿Mucho o poco?		Lo valora mucho Lo valora No lo valora	1 2 3	TODOS PASE A P15
P13	SÓLO SI P6 = 2 Hay recorridos que tienen horarios de pasada establecidos, para facilitar la programación de su viaje: ¿Cuánto valora que existan recorridos con horarios establecidos de llegada a la parada (o fijos)? RU Si dice que lo valora → ¿Mucho o poco?		Lo valora mucho Lo valora No lo valora	1 2 3	
P14	SÓLO SI P6 = 2 ¿Usted programaría su hora de llegada al paradero según el horario de pasada del bus? ¿Cuántos minutos se programa? RU		SI NO Minutos ¿Cuántos? _____	1 2	
P15	¿Recuerda cuánto tiempo aproximadamente espera en el paradero, hasta que este recorrido pasa y se pueda subir? RU		REGISTRE EN MINUTOS [] No sabe → 99		

P16	Según su experiencia, cuando usted hace parar los buses del recorrido...: El bus se detiene... LEER OPCIONES?	Siempre o casi siempre A veces se detiene y a veces no Se detiene muy pocas veces	1 2 3
P17	¿Cuál es el propósito de su viaje por el que usa el recorrido...? RM	Trabajo Estudio Entretenimiento Otro ¿Cuál: _____	1 2 3 4
INFORMACIÓN			
P18	¿Desde cuándo utiliza el recorrido...? RU	Hace 1 Semana Hace 1 mes Hace 2 a 3 meses Hace 6 a 12 meses Hace más tiempo NS/NR	1 2 3 4 5 99
P19	Sólo con fines de clasificación, ¿Podría decirme su edad?		EDAD [_____]
P20	Registre sexo del entrevistado/a	Masculino 1	Femenino 2

*RU: Respuesta Única.
*RM: Respuesta Múltiple.

TERMINAR Y AGRADECER

Figura C.1. Encuesta piloto

Anexo D

Encuesta presencial

Encuesta Memoria		Año			/220			
				2	0			1	8
CONTACTE HOMBRES Y MUJERES DE 15 AÑOS O MÁS									
Buenos días/ tardes, Memorista de la Universidad de Chile está recopilando información del sistema y nos gustaría conocer su opinión, al final del proceso se sortearán dos entradas dobles para el Cine Hoyts. ¿Le podría hacer unas breves preguntas? SÓLO SI PREGUNTA: Todas las respuestas serán confidenciales.									
FILTRO									
F1	En los últimos 3 meses, ¿Usted recuerda haber usado el recorrido.....?	Sí	1						
		No	2						
F2	De los mencionados anteriormente, ¿Qué recorridos le sirven para su viaje?	REGISTRE						[]	
F3	Nos podría proporcionar su mail para contactarlo en caso de ganarse el sorteo.	REGISTRE						[]	
CUESTIONARIO									
EXPERIENCIA CON SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO									
P1	De 1 a 7, en general, ¿Con qué nota evalúa...? RU								
P1a	El sistema de transporte público de Santiago	1	2	3	4	5	6	7	9 [NS/NR]
P1b	Al recorrido: ...	1	2	3	4	5	6	7	9 [NS/NR]
HÁBITOS Y SERVICIO									
P2	¿Con qué frecuencia usa el/los recorrido(s) ...? RU	Todos los días Todas las semanas Todos los meses Con menor frecuencia NS/NR						1 2 3 4 99	
P3	Cuando usa el/los servicio(s) ..., ¿lo hace en días de semana, fines de semana o ambos? RU	Días de semana Fin de semana Ambos						1 2 3	

		Horario	Día de Semana	Sábado/ Domingo	
P4	¿Y en qué horarios usa el/los recorrido(s)...? RM	Punta mañana: 06:00 a 08:59 Valle AM: 09:00 a 12:29 Valle PM: 12:30 a 17:59 Punta tarde: 18:00 a 19:59 Valle Noche: 20:00 a 23:59 Nocturno: 00:00 a 05:59	1 2 3 4 5 6	1 2 3 4 5 6	
P5	¿Sabía que este recorrido tiene horarios establecidos de pasada?		SI NO	1 2	SIGA P13
P6	SÓLO SI P5 =1 ¿Usted usaba esta línea antes de saber que los horarios de pasada son establecidos? RU		SI NO	1 2	
P7	SÓLO SI P5 =1 ¿Cómo supo que tiene horarios establecidos? RM	Conductor Página web de Transantiago Algún familiar o conocido Información en la parada (letrero) Me di cuenta al usarlo Monitor Informativo/volante Otros ¿Cuál? _____		1 2 3 4 5 6 7	
P8	SÓLO SI P5 =1 ¿Usted Conoce el itinerario del recorrido? RU		Sí No	1 2	
P9	SÓLO SI P5=1 ¿Usted programa su hora de llegada al paradero según el horario de pasada del bus? ¿Cuántos minutos se programa? RU		SI NO	1 2	Minutos ¿Cuántos? _____
P10	SÓLO SI P5 =1 Según su experiencia, los buses del/los recorrido(s) ¿Cumplen... LEER OPCIONES?	Siempre o casi siempre cumple el horario A veces cumplen el horario Muy pocas veces cumplen el horario		1 2 3	P12 SIGA SIGA
P11	SÓLO SI P5 =1 & P10 = 2 o 3 Cuando no cumplen el horario, ¿por cuántos minutos se demora aproximadamente?		Minutos ¿Cuántos? _____ No sabe	99	
P12	SÓLO SI P5 =1 ¿Cuánto valora que existan recorridos con horarios de parada establecidos (o fijos)?		Lo valora mucho Lo valora No lo valora	1 2 3	P15 P15 P15
P13	SÓLO SI P5 = 2 Hay recorridos que tienen horarios de pasada establecidos, para facilitar la programación de su viaje: ¿Cuánto valora que existan recorridos con horarios establecidos de llegada a la parada (o fijos)? RU Si dice que lo valora → ¿Mucho o poco?		Lo valora mucho Lo valora No lo valora	1 2 3	
P14	SÓLO SI P5 = 2 ¿Usted programaría su hora de llegada al paradero según el horario de pasada del bus? ¿Cuántos minutos se programa? RU		SI NO	1 2	Minutos ¿Cuántos? _____

P15	¿Recuerda cuánto tiempo aproximadamente espera en el paradero, hasta que este recorrido pasa y se pueda subir? RU	REGISTRE EN MINUTOS [] No sabe → 99	
P16	Según su experiencia, cuando usted hace parar los buses del recorrido...: El bus se detiene... LEER OPCIONES?	Siempre o casi siempre A veces se detiene y a veces no Se detiene muy pocas veces	1 2 3
P17	¿Cuál es el propósito de su viaje por el que usa el recorrido...? RM	Trabajo Estudio Entretenimiento Otro ¿Cuál: _____	1 2 3 4
INFORMACIÓN			
P18	¿Desde cuándo utiliza el recorrido...? RU	Hace 1 Semana Hace 1 mes Hace 2 a 3 meses Hace 6 a 12 meses Hace más tiempo NS/NR	1 2 3 4 5 99

*RU: Respuesta Única.

*RM: Respuesta Múltiple.

TERMINAR Y AGRADECER

Figura D.1. Encuesta presencial

Anexo E

Encuesta online

Encuesta

Hola, mi nombre es Hans, Memorista de la Universidad de Chile y me gustaría conocer tu opinión sobre la información disponible en algunos recorridos de Transantiago. Estos datos nos permitirán conocer que tan buenos son actualmente los canales de comunicación. Recuerda ingresar tu dirección de correo electrónico para participar en el sorteo de dos entradas dobles a Cine Hoyts!

* Required

¿Qué servicio(s) usa(s)? *

- G02
- G07
- H05
- H12
- J06
- J07
- J07e
- J11
- J17
- C08
- C12
- C13
- C17
- C19

¿Sabía que el(los) recorrido(s) tiene(n) horarios establecidos de pasada? *

- Sí
- No

Figura E.1. Inicio encuesta online

Encuesta

* Required

¿Usted conoce el itinerario del recorrido? *

Sí

No

¿Usted programa su hora de llegada al paradero según el horario de pasada del bus? ¿cuántos minutos se programa? *

Your answer

Según su experiencia, los buses del/los recorridos(s) ... *

Siempre o casi siempre cumple el horario

A veces cumplen el horario

Muy pocas veces cumplen el horario

Never submit passwords through Google Forms.

Figura E.2. Preguntas realizadas a personas que declaran conocer la operación con itinerarios, encuesta online

Encuesta

* Required

¿Usted programaría su hora de llegada al paradero según el horario de pasada del bus? *

Sí

No

Never submit passwords through Google Forms.

Figura E.3. Pregunta realizada a personas que declaran no conocer la operación con itinerarios, encuesta online

Encuesta

* Required

¿Recuerda cuánto tiempo aproximadamente espera en el paradero, hasta que este recorrido pasa y se pueda subir? *

Indicar minutos aproximados, si no sabe poner 0

Your answer

Según su experiencia, cuando usted hace parar los buses del recorrido: El bus se detiene... *

- Siempre o casi siempre
- A veces se detiene y a veces no
- Se detiene muy pocas veces

¿Cuál es tu correo? *

Your answer

BACK

SUBMIT

Never submit passwords through Google Forms.

Figura E.4. Cierre encuesta online

