

# CÁLCULO DE INDICADORES DE CALIDAD DE SERVICIO PARA EL SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO DE SANTIAGO A PARTIR DE DATOS PASIVOS

#### TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN TRANSPORTE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

CÉSAR LUIS NÚÑEZ SEPÚLVEDA

PROFESORES GUÍA:

ANTONIO GSCHWENDER KRAUSE MARCELA MUNIZAGA MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ALEJANDRO TIRACHINI HERNÁNDEZ JUAN CARLOS MUÑOZ ABOGABIR

> SANTIAGO DE CHILE MARZO 2015

#### RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL

TÍTULO DE: Ingeniero Civil y grado de Magíster en

Ciencias de la Ingeniería, mención Transporte

POR: César Luis Núñez Sepúlveda

FECHA: Marzo 2015

PROFESORES GUÍA: Antonio Gschwender Krause

Marcela Munizaga Muñoz

### CÁLCULO DE INDICADORES DE CALIDAD DE SERVICIO PARA EL SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO DE SANTIAGO A PARTIR DE DATOS PASIVOS

El sistema de transporte público de Santiago (Transantiago) posee como único medio de pago una tarjeta electrónica (Bip!) y además en cada uno de los 6.000 buses del sistema hay aparatos GPS que registran su posición cada 30 segundos. Estas fuentes de información pasiva, que son extensivas y de bajo costo, permiten obtener información útil para la modelación de la demanda y el monitoreo de la operación del sistema. En el presente trabajo se calculan indicadores de calidad de servicio con las matrices OD generadas por a partir del seguimiento de las tarjetas Bip! y las emisiones GPS.

Antes de realizar el cálculo de indicadores, se realizan mejoras a la información de los viajes, orientadas específicamente a errores u omisiones que podrían sesgar el cálculo de ellos. En primer lugar se realizan correcciones que caracterizan de mejora forma los viajes: por un lado se corrige las etapas en metro mediante la incorporación de información exógena como el tiempo de caminata de acceso y egreso en las estaciones, además de los tiempos de transbordo internos en las estaciones. Por otro lado, se desarrolla mejoras metodológicas en los cálculos del tiempo de viaje en vehículo, espera y caminata para corregir comportamientos que no se condicen con la realidad. En segundo lugar, se desarrollan criterios para eliminar viajes considerados anómalos. Éstos logran eliminar el 6,96% de los viajes, lo que muestra la relevancia de esta tarea para obtener indicadores creíbles.

Una vez que los viajes son corregidos y filtrados, se miden indicadores con distintos niveles de desagregación temporal y espacial. Los indicadores medidos son: tiempo de viaje, número de etapas por viaje, distancia euclidiana de viaje, velocidad de viaje de los usuarios, razón distancia en ruta / distancia euclidiana, velocidad bus v/s auto y transbordos críticos, los cuales permiten realizar diagnósticos focalizados del servicio ofrecido a los usuarios. Se concluye que en promedio, los viajes más largos, más demorosos y con mayor número de etapas son aquellos que se inician entre 5:00 y 5:30, lo que se relaciona con los pares O-D de los viajes realizados en ese período (usualmente desde poniente y el sur al sector oriente de la capital).

Finalmente, se realizan comparaciones de distintos indicadores de regularidad. Se comparan tres indicadores de regularidad basados en los definidos por los contratos de Transantiago con el indicador  $TE_{95}/h$ , definido como la razón entre le percentil 95 del tiempo de espera y el intervalo programado del servicio, y que se utilizará como referencia de la percepción de regularidad de los usuarios. Se concluye que el indicador actualmente utilizado por Transantiago es aquel que tiene un comportamiento más parecido a  $TE_{95}/h$ .

### **Agradecimientos**

A Sebastián Puelma, porque gracias a su ayuda desinteresada logré entrar a la gloriosa Escuela de Ingeniería y ahora tengo la posibilidad de escribir estas palabras.

A todas aquellas personas de las que tuve el honor de aprender. En especial, agradezco a los académicos de la División de Ingeniería de Transporte, y muy especialmente a mis profesores guía Antonio Gschwender y Marcela Munizaga. Muchas gracias por inculcarme el amor por esta disciplina, y por darme su ejemplo no sólo de competencia profesional, si no que también de integridad personal.

A todos con quienes compartí en estos años en Beauchef. A Camilo, Seba A., Morza, Nathy, Furbina, Gaby, Alexis, Jechu, Javier, Master, Christian, Matías, Mijo, Agustín y tantos otros con los que pasamos momentos de estrés mechón, pero también de risas y buenos momentos. También a Fernando, Diego, Tomás, Potter, Nacho, César, Manteca, CHerrera, Érico, JPCavada, Paleon, Crmaldón, Andrea, Eve y a todos con quienes pasamos grandes momentos jugando con las estructuras, el agua, el suelo, las micros, pero especialmente con las ganas de lograr una sociedad más justa. Espero que nunca perdamos el contacto. Mención especial a la Carlota y la Julie por ser parte del Eurotrip, el mejor broche de oro que podría tener de esta etapa.

A Transantiago y la Unidad Operativa de Control de Tránsito por la información facilitada, y a todos aquellos voluntarios que pusieron su granito de arena y midieron sus caminatas para ayudarme a terminar este trabajo, sin su ayuda no lo habría logrado!. A Mauricio, Richard y Raúl por ayudarme a sobreponerme a mi ineptitud computina y estar disponibles siempre que necesité soporte.

A todos mis alumnos del taller de matemáticas, por aguantar mi locura y dejarme mostrarles (y mostrarme) que las cosas se logran con convicción, esfuerzo y sacrificio. Espero que cumplan todas las metas que se propongan.

A la Cote, el Omar y todas las personas que me ayudaron a ponerle ritmo y sabrosura a la vida.

A ti Cami, por quererme, acompañarme y animarme justo en este momento en que necesitaba el último empujoncito. Contigo, todo es más fácil y llevadero.

Finalmente, quiero agradecer a mis padres Luis y Gloria, a mi hermana Débora y a mis sobrinos Matías, Agustín y Tomás. Gracias por el cariño, el apoyo, y por entregarme todas las enseñanzas que ninguna educación formal puede entregar y que nunca olvidaré, porque al final son las más importantes para la vida.

### Tabla de Contenido

1.	Intro	oducción	1
	1.1.	Motivación	1
	1.2.	Objetivos	
	1.3.	Contribuciones	2
	1.4.	Estructura de la tesis	3
2.	Revi	sión Bibliográfica	4
	2.1.	Indicadores de calidad de servicio	6
	2.1.1	. Introducción	6
	2.1.2	L. Uso	6
	2.1.3	S. Fuentes de información	7
	2.1.4	Atributos relevantes	9
	2.1.5	S .	
		6. Cálculo de indicadores con datos pasivos	
	2.2.	Regularidad	
	2.3.1	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
	2.3.	Comentarios y conclusiones	20
3.	Desc	ripción de los datos disponibles	22
	3.1.	Base de horas de pasada por paraderos	
	3.2.	Base de datos de viajes	
	3.3.	Información geográfica	26
4.	Corr	ecciones a la tabla de viajes	28
	4.1.	Corrección de variables de servicio en la tabla de viajes	
		Tiempos de caminata de acceso y egreso en estaciones de metro	
	4.1.2	Corrección de tiempos en tabla de viajes	
	4.2.	Filtrado de viajes anómalos	
	4.2.1		
	4.2.2		
	4.2.3		
	4.2.4		
	4.2.5	,	
	4.2.6	,	
		'. Viajes de 4 etapas	
	4.2.8	B. Etapa redundante	46

4.2	2.9. Ciclo en etapa intermedia	47
	2.10. Resumen de viajes filtrados	
5. De	finición y cálculo de indicadores de calidad de servicio	49
5.1.	Indicadores a nivel de sistema	49
5.2.	Indicadores a nivel de comuna	51
5.3.	Indicadores a nivel de zona 777	52
5.4.	Indicadores a nivel de eje	54
5.5.	Indicadores a nivel de paradero	56
6. An	álisis comparativo de indicadores de regularidad	61
6.1.	Descripción de indicadores a utilizar	61
6.2.	Comparación de indicadores	64
7. Co	nclusiones y futuras líneas de investigación	69
7.1.	Síntesis y conclusiones	69
7.2.	Futuras líneas de investigación	
8. Bil	oliografía	72
Anexos		76
A.1:	Tiempos de caminata en estaciones de Metro	76
A.2:	Tiempo de caminata utilizado en transbordos entre estaciones de metro	80
ΑЗ٠	Errores de estimación de niveles de servicio en zonas pagas	81

## Índice de Tablas

Tabla 2.1: Indicadores de regularidad para distintos valores de CV, bajo distribución norma	al
de intervalos.	.18
Tabla 2.2: Usos potenciales de los indicadores de regularidad	.19
Tabla 4.1: Criterios DR/DE para descartar viajes	.42
Tabla 4.2: Criterios para filtrar velocidades bajas/altas	.44
Tabla 4.3: Viajes filtrados	.48
Tabla 5.1: Velocidad de auto v/s bus, en ejes UOCT	.55
Tabla 5.2: Grupos de paradas con mayor consumo de tiempo en transbordos, en período	
Punta Mañana	.58
Tabla 5.3: Grupos de paradas críticos, en período Punta Mañana	59

# Índice de Figuras

Figura 2.1: Marco conceptual de indicadores de operación	4
Figura 2.2: Perspectivas de indicadores en TP	5
Figura 2.3: Tiempo de viaje, por media hora de inicio y tipo de día	13
Figura 3.1: Estimación de paradero de bajada	24
Figura 3.2: Estimación de los viajes	24
Figura 3.3: Zonificación 777	27
Figura 4.1: Viaje bus – bus sin corregir	30
Figura 4.2: Viaje bus – bus corregido	30
Figura 4.3: Viaje bus – metro sin corregir	30
Figura 4.4: Viaje bus – metro corregido	31
Figura 4.5: Viaje metro – bus sin corregir	31
Figura 4.6: Viaje metro – bus corregido	31
Figura 4.7: Indicadores de tiempo de viaje, para viajes de 2 etapas	34
Figura 4.8: Viaje con ruta intrincada	37
Figura 4.9: Bus con sentido incorrectamente asignado	38
Figura 4.10: Relación DR/DE, para viajes alimentador – alimentador	38
Figura 4.11: Viajes entre sector residencial e industrial de Quilicura	39
Figura 4.12: Relación DR/DE, para viajes alimentador - troncal	40
Figura 4.13: Relación DR/DE, para viajes alimentador-metro	40
Figura 4.14: Relación DR/DE, para viajes troncal – metro	41
Figura 4.15: Relación DR/DE, para viajes troncal - troncal	41
Figura 4.16: Relación DR/DE, para viajes de 3 etapas	42
Figura 4.17: Filtro de velocidades altas.	43
Figura 4.18: Viajes de 4 etapas, con hora de inicio entre las 6:00 y 7:59 hrs	45
Figura 4.19: Viajes de 4 etapas, con hora de inicio entre las 8:00 y 21:59 hrs	45
Figura 4.20: Viajes de 4 etapas, con hora de inicio entre las 22:00 y 5:59 hrs	46
Figura 4.21: Etapa redundante	46
Figura 4.22: Ciclo en etapa intermedia	47
Figura 5.1: Indicadores de calidad de servicio, según mediahora de inicio del viaje	50
Figura 5.2: Tiempo máximo de viaje, según mediahora de inicio del viaje	51
Figura 5.3: Velocidad de desplazamiento v/s relación DR/DE, entre pares de comunas	52
Figura 5.4: Número de etapas para llegar a la zona centro de Santiago, por zona 777 de	
origen, en período Punta Mañana	
Figura 5.5: Tiempo de viaje (sin caminatas ni espera inicial) hacia la zona centro de Santia	
por zona de origen, en período Punta Mañana	54

Figura 5.6: Comparación de tiempos de viaje termómetro v/s tabla de viajes, en período	
Punta Mañana	57
Figura 6.1: Relación entre indicadores de regularidad para todos los paraderos del servicio	0
201I, en período Punta Mañana	64
Figura 6.2: Indicadores de regularidad normalizados para todos los paraderos del servicio	)
201I, en período Punta Mañana	65
Figura 6.3: E v/s I <sup>1,5</sup> , para el servicio I08I	66
Figura 6.4: TE <sub>95</sub> /h v/s I <sup>1,5</sup> , para el servicio I08I	67
Figura 6.5: TE <sub>95</sub> /h v/s E, para el servicio I08I	67

### 1. Introducción

#### 1.1. Motivación

En las últimas dos décadas alrededor del mundo, y especialmente en la última década en Latinoamérica, el uso de tarjetas inteligentes se ha masificado como medio de pago en el transporte público. La entusiasta adopción de esta tecnología se debe a que reporta ventajas tanto a usuarios como a operadores: a los usuarios les evita tener que portar efectivo y el trámite engorroso de pagar al conductor y/o cobrador, además de percibir esta tecnología como signo de modernidad, eficiencia y seguridad. Para los operadores, el poder implementar esquemas tarifarios más flexibles, evitar que los conductores manejen dinero (lo que redunda en mayor seguridad para ellos) y la disminución del tiempo de subida de pasajeros (que implica una disminución del tiempo de ciclo con el consiguiente ahorro en recursos), entre otros, han sido motivos suficientes para ir incorporando esta tecnología.

A pesar de que el propósito primordial de las tarjetas es la recaudación de la tarifa, planificadores y operadores se han percatado de que los datos generados a partir del proceso contienen información de gran utilidad para obtener resultados útiles en la planificación y la operación de los sistemas de transporte. La información generada por ésta y otras fuentes de recolección pasiva de datos (tales como emisiones de GPS de los buses, entre otras) es altamente detallada y muchas veces es entregada en tiempo real, lo que posibilita el cálculo de una gran cantidad de indicadores con alto nivel de desagregación y bajo costo. Estas ventajas con respecto a los métodos tradicionales de recolección de datos, típicamente mediciones específicas que resultaban mucho más lentas y costosas, han dado un nuevo impulso a las mediciones de indicadores y de la satisfacción de los usuarios.

La clasificación más ampliamente aceptada de indicadores está dada por TRB (2003b), que los separa en dos tipos: indicadores de operación e indicadores de calidad de servicio; los últimos son particularmente importantes puesto que representan el punto de vista de los usuarios. Diversos autores (Ortúzar et al., 1997; dell'Olio et al., 2010; Hensher et al., 2003; Tyrinopoulos y Antoniou, 2008; Raveau et al., 2010 y Donoso et al., 2013 por citar algunos) indican que atributos como el tiempo de viaje en vehículo, tiempo de espera, tiempo de caminata, frecuencia, cobertura, nivel de ocupación de los vehículos, posibilidad de viajar sentado, regularidad en el tiempo de espera y de viaje en vehículo, número de transbordos y el tiempo de viaje en transporte público versus auto, entre otros, son relevantes desde el punto de vista del usuario para medir calidad de servicio. Alrededor del mundo se han calculado indicadores de calidad de servicio con fuentes pasivas, entre los cuales destacan los aportes de Bertini y El-Geneidy (2003), Trépanier et al. (2009), Bagchi y White (2005), Utsunomiya et al. (2006) y Park et al. (2008). En particular, Beltrán et al. (2013) calculan tiempos de espera, de viaje y número de etapas con los datos de Santiago.

Uno de los indicadores de calidad de servicio que merece ser analizado en profundidad es el tiempo de transbordo, debido a que el fenómeno se ha estudiado bajo supuestos simplificadores que obvian el funcionamiento real del sistema de transporte. En particular, incorporar el efecto de 1) las líneas comunes (cuando al usuario le sirve más de una línea

para llegar a su destino) y 2) la congestión en tiempo de espera (imposibilidad de abordar un bus por estar lleno) es necesario para representar adecuadamente el fenómeno desde el punto de vista de los usuarios, en particular la componente del tiempo de espera.

Otro indicador relevante de estudiar detalladamente es la regularidad. La literatura reporta mayoritariamente medidas estadísticas enfocadas en la operación, sin embargo investigación reciente acerca de la medición de indicadores muestra que la percepción de la variabilidad por parte de los usuarios puede quedar mejor representada por el tiempo de percentil extremo que por la varianza (Lam y Small, 2001). Luego, la tarea de definir indicadores de confiabilidad que representen el punto de vista de los usuarios sea una tarea no trivial ya que ni la teoría es concluyente acerca del tema ni las oficinas de transporte han logrado consensuar qué indicadores utilizar para medir la regularidad en la práctica. Por ejemplo, en la ciudad de Santiago se mide regularidad con dos indicadores diferentes dependiendo de la frecuencia del servicio (MTT, 2012).

Lo que se pretende realizar en la presente tesis es calcular éste y otros indicadores de calidad de servicio a partir de los datos pasivos disponibles en la ciudad de Santiago con un alto nivel de detalle temporal y espacial. Este trabajo permitirá analizar el estado actual del sistema y también desarrollar metodologías que permitan automatizar estos procedimientos de modo de obtener un análisis sistemático de largo plazo.

#### 1.2. Objetivos

El objetivo general de la tesis es determinar un conjunto de indicadores que permitan medir la calidad de servicio del transporte público de Santiago, dada la disponibilidad de datos actual y futura por parte del sistema Transantiago. Estos indicadores deberán permitir establecer estándares de calidad y orientará su planificación futura. Objetivos específicos son:

- Evaluar la calidad de los datos pasivos disponibles para el transporte público de Santiago, y en caso que presenten algún defecto, proponer metodologías para corregirlos y/o filtrarlos.
- Determinar los indicadores de calidad de servicio que se encuentran en el estado del arte y que pueden ser calculados con las fuentes pasivas de información disponibles en Transantiago.
- Calcular diversos indicadores de calidad de servicio, tales como tiempos de viaje en sus diferentes componentes (espera, en bus, transbordo), número de etapas, entre otros, con distintos niveles de desagregación, tanto temporal como espacial.
- Calcular y analizar comparativamente indicadores de regularidad.

#### 1.3. Contribuciones

Las contribuciones de la presente tesis son:

 Demostrar la factibilidad de calcular indicadores de calidad de servicio de forma masiva, con un gran nivel de desagregación tanto temporal como espacial y a bajo costo.

- Mejorar la información de tiempos de viaje, espera y transbordo obtenida a partir del seguimiento de las tarjetas mediante la incorporación de información exógena y algunas mejoras metodológicas.
- 3) Desarrollar criterios que permitan filtrar viajes considerados anómalos, de manera de tener un conjunto que sea efectivamente representativo de las experiencias reales de los usuarios a la hora de calcular indicadores de calidad de servicio.

#### 1.4. Estructura de la tesis

En el Capítulo 2 se realiza una revisión bibliográfica sobre medición de indicadores de calidad de servicio, enfocándose en aquellos obtenidos a través de datos pasivos. En este capítulo se realiza un estudio particularmente intenso de los indicadores de regularidad, enfocándose tanto en aquellos que sean mayormente propuestos por la literatura y en los utilizados en las oficinas de transporte a lo largo del mundo.

Luego, en el Capítulo 3 se presenta la recopilación y descripción de los datos disponibles en Transantiago para el cálculo de indicadores. Debido a la precisión que se requiere de los datos para obtener indicadores creíbles, es que en esta etapa se verificará la calidad y la consistencia de los datos de entrada, y en caso que no cumplan los estándares requeridos se propondrán criterios para corregirlos y filtrarlos. Los resultados de este último esfuerzo se reportan en el Capítulo 4.

Con los datos ya corregidos y filtrados, se calculan indicadores de calidad de servicio con distintos niveles de desagregación espacial y temporal. En el Capítulo 5 se procede a realizar lo anterior con la mayor parte de los indicadores a excepción de los indicadores de regularidad, que se presentan en el Capítulo 6. En este último Capítulo se presenta un análisis comparativo de los indicadores actualmente utilizados en Transantiago con aquellos que están en el estado del arte y también con aquellos utilizados por otras oficinas de transporte.

Finalmente, en el Capítulo 7 se presentan las conclusiones generales del trabajo realizado. Adicionalmente, se proponen futuras líneas de investigación, enfatizando aspectos relativos a la experiencia de viaje de los usuarios que los datos pasivos no podrán medir y que son relevantes a la hora de medir calidad de servicio. En cada caso se intenta describir los datos que se deberían recolectar y las metodologías que se deberían aplicar para llevar a cabo la tarea.

### 2. Revisión Bibliográfica

La medición de indicadores para el transporte público ha sido una preocupación desde hace varias décadas para planificadores, fiscalizadores y operadores alrededor del mundo. En sus inicios, la medición de indicadores estaba orientada principalmente a optimizar los costos e ingresos de la operación mediante el cálculo de indicadores de efectividad y eficiencia del servicio ofrecido (Fielding et al. 1985). Los indicadores orientados a modelar la demanda, y especialmente aquellos destinados a entender los procesos de decisión de los usuarios fueron poco desarrollados debido a que el cálculo de este tipo de resultados es intensivo en la cantidad de datos requeridos para poder obtenerlos, y por ende se presume que son costosos de calcular mediante los métodos tradicionales de recolección.

En los sistemas de transporte público urbano los criterios para diferenciar los indicadores son variados. Fielding et al. (1978) los clasifica en indicadores de eficiencia de costos (relación entre insumos y cantidad de servicio ofrecido), indicadores de efectividad de costos (relación entre uso del servicio e insumos empleados) e indicadores de efectividad de servicio ofrecido (intensidad de uso del servicio). Un modelo conceptual de la clasificación anterior se muestra en la Figura 2.1:

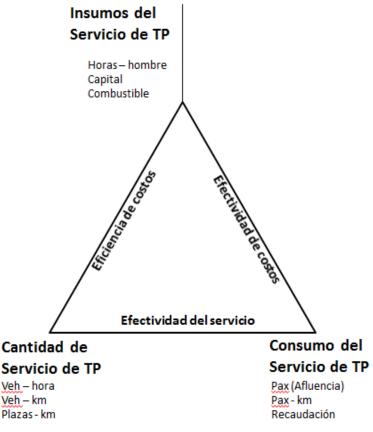


Figura 2.1: Marco conceptual de indicadores de operación. Fuente: Fielding et. al (1978)

Según la clasificación mostrada anteriormente, un indicador de eficiencia de costos son los veh – km por litro de combustible, pues es una relación entre la cantidad de servicio ofrecido (veh – km) y los insumos necesarios para ofrecerlo (el combustible). Por otro lado, un indicador de efectividad de costos es la afluencia de pasajeros por dólar gastado; finalmente, un indicador de efectividad del servicio es la recaudación por veh-km operado. La clasificación anterior está fuertemente enfocada a la perspectiva del operador, por lo que se han creado criterios alternativos para clasificar los indicadores en el transporte público. TRB (2003b) clasifica los indicadores en dos tipos:

- Indicadores de rendimiento u operación, que corresponden a un factor cuantitativo o cualitativo utilizado para evaluar un aspecto particular del servicio de transporte público, e
- *Indicadores de calidad de servicio*, que son indicadores de rendimiento cuantitativos que describen de la mejor manera posible un aspecto particular del servicio de transporte público, y representan el punto de vista de los usuarios.

A modo de ejemplo, el atributo "afluencia de una línea" es un indicador de rendimiento pero no es un indicador de calidad de servicio puesto que no representa el punto de vista del usuario. Por otro lado, el atributo "tiempo de viaje" sí corresponde a un indicador de calidad de servicio, puesto que es un aspecto del servicio de transporte relevante desde el punto de vista de los usuarios y además es cuantificable. Eboli y Mazzulla (2012) profundizan en el punto anterior indicando que la utilidad de un indicador depende fuertemente del punto de vista con el cual se le esté mirando. Para ello distinguen tres perspectivas con las cuales mirar los indicadores: pueden estar orientados al punto de vista del usuario, del operador y/o de la comunidad. Dado que hay indicadores que pueden estar orientados a más de un ente, se muestra un esquema conceptual de las posibles combinaciones de puntos de vista que puede recoger un indicador en la Figura 2.2:

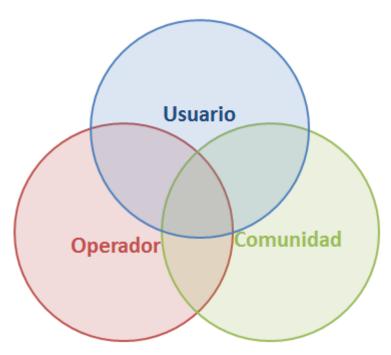


Figura 2.2: Perspectivas de indicadores en TP. Fuente: Eboli y Mazzula (2012)

El punto de vista del usuario se refiere a la percepción que el usuario tiene del servicio, el punto de vista del operador tiene que ver con el rendimiento del servicio desde el punto de vista comercial. Finalmente, el punto de vista de la comunidad es un poco más amplio, y evalúa el impacto del transporte público en diferentes aspectos relevantes para la comunidad en su conjunto, tales como la creación de empleos, valorización del suelo, crecimiento económico, contribuciones a la movilidad de la sociedad y el impacto del transporte público en el medioambiente, entre otros. Un ejemplo de lo anterior consiste en la aplicación del concepto del *option value* en el transporte público, que consiste en la disposición a pagar por preservar un bien o servicio público, incluso si hay pocas o nulas probabilidades de usarlo. Geurs et al. (2006) han calculado esta valoración para dos enlaces ferroviarios en Holanda, y es una muestra de los beneficios del transporte público desde el punto de vista de la comunidad.

En la Sección 2.1 se realizará una descripción de los indicadores de calidad de servicio de uso más común alrededor del mundo, mientras que en la Sección 2.2 se profundizará en la descripción de indicadores de confiabilidad.

#### 2.1. Indicadores de calidad de servicio

#### 2.1.1. Introducción

La calidad de servicio es definida por TRB (2003b) como *el desempeño general (medido o percibido), del servicio de transporte desde el punto de vista del usuario*. Esta definición trae consigo una complejidad: por un lado, la medición de indicadores objetivos puede decir poco acerca de la percepción de los usuarios si es que no se calculan los indicadores correctos, o bien si éstos no se asocian a estándares que reflejen las expectativas de los usuarios. Por otro lado, si se evalúa la calidad de servicio sólo a través de las percepciones de los usuarios, carecería de herramientas que permitan identificar el impacto de variaciones en los indicadores objetivos y por lo tanto en el nivel de servicio. Por lo tanto, lo ideal al medir calidad de servicio es contar con mediciones cuantitativas de los atributos relevantes junto con medidas de la percepción de la calidad de servicio (y/o de las componentes relevantes del viaje) de los usuarios.

#### 2.1.2. Uso

El uso que se le quiera dar a los indicadores depende de quién los está midiendo. La oficina de transporte podría quererlos para monitorear la situación del sistema de transporte en tiempo real, para fiscalizar el cumplimiento de estándares o bien para entender el comportamiento de la demanda y ajustar trazados o frecuencias. Labores tales como la evaluación económica y de eficiencia probablemente estén dentro del interés del operador. La literatura (TRB, 2003a; Utsunomiya et al., 2006) reporta los siguientes potenciales usos para los indicadores:

- Monitoreo, lo cual es de suma utilidad medir las distintas componentes de la experiencia de viaje de los usuarios. Lo anterior permite reaccionar si la operación no satisface los estándares establecidos.
- Fiscalización, dado que en numerosas ciudades del mundo el servicio de transporte es licitado por parte del gobierno central o local, y éstos deben velar por el cumplimiento de los contratos. El cumplimiento de este objetivo suele estar asociado

- a la obtención de indicadores, y los datos pasivos, que son masivos y baratos de obtener resultan ser de gran utilidad para realizar esta tarea.
- Planificación, pues la obtención de indicadores de distinta índole para varios cortes temporales permite tener información más completa respecto de la evolución de indicadores clave que resulta fundamental para desarrollar planes que involucren el diseño de infraestructura, servicios (trazados y frecuencias) y otros.
- Finanzas, ya que a partir de los indicadores de operación es posible calcular o estimar indicadores económicos (tales como ingresos, costos o elasticidades). Estos indicadores son insumos de gran valor a la hora de evaluar políticas tarifarias y/o subsidios, así como al evaluar el servicio desde una perspectiva económica.
- Marketing, pues cuando las transacciones están clasificadas por tipo de tarjeta (y mejor aún si es que son personalizadas y se cuenta con información socioeconómica de los individuos) es posible realizar segmentación de usuarios en función de los servicios que realizan, lo que es de gran utilidad para poder brindar mejoras focalizadas a cada tipo. También a partir de los patrones de uso (a nivel temporal, espacial o de servicio) de cada tipo de usuario es posible asignar los espacios publicitarios a nivel de servicio o parada para así cumplir los objetivos del marketing.
- Retención de usuarios, debido a que a través de las transacciones se puede obtener la variación en la demanda desagregado a nivel de servicio y tipo de tarjeta. Tal nivel de desagregación permite entender mejor las razones por las cuales los usuarios modifican sus hábitos de uso o abandonan el sistema, y así tomar medidas focalizadas.
- Atracción de nuevos usuarios, entendiendo las razones por las cuales los usuarios abandonan el sistema, es posible desarrollar herramientas similares para determinar cómo mejorar el sistema de transporte de manera de atraer potenciales usuarios.
- Mejora en la imagen púbica, pues resulta relevante generar herramientas que permitan relacionar la imagen del servicio de transporte público con indicadores del sistema sobre los cuales se pueda intervenir. Lo anterior es particularmente apreciado en algunas oficinas de transporte puesto que termite atraer fondos o tener facilidades en la operación por parte de los gobiernos locales.

#### 2.1.3. Fuentes de información

Las fuentes de información utilizadas para medir indicadores se pueden dividir en dos grandes grupos: aquellas que en principio tenían propósitos diferentes a la generación de indicadores y las que son especialmente recolectadas para estos fines. Sobre aquellos datos que no tienen por primera función ser utilizados para indicadores se puede decir que en épocas previas a la existencia de datos pasivos en grandes magnitudes, la información utilizada provenía de fuentes tales como los itinerarios, mapas, estándares de diseño del servicio, registros de accidentes e incidentes, datos financieros y de la flota, y registros de reclamos, entre otros (Eboli y Mazzulla, 2012). Chu et al. (2011) distinguen 4 fuentes importantes de información pasiva que si bien se recolectan para fines distintos a la obtención de indicadores son útiles para medirlos:

AFC (Automated Fare Collection). Corresponde a las transacciones con tarjetas inteligentes. La utilidad de esta información depende de la tasa de penetración de este medio de pago y del instante (o los instantes) del viaje (o las etapas del viaje) donde se realiza la validación. En Santiago, la validación ocurre al iniciar la etapa del usuario, pero en sistemas como el de Londres o Seúl se debe validar al iniciar y

terminar cada etapa (o cada una de las etapas del mismo), en otros como las zonas pagas de Santiago la validación se realiza en una zona de pago extravehicular (es decir, antes de iniciar el viaje) y hay otras donde la validación se puede realizar en cualquier instante del viaje, como es el caso del sistema de buses de Sao Paulo.

- APC (Automatic Passenger Counting). Información obtenida a partir de los contadores de pasajeros ubicados en las puertas de los buses. Dado que en la mayoría de los casos la tecnología utilizada es un sensor de movimiento, la precisión de esta información está principalmente por la capacidad del sistema de transporte de evitar aglomeraciones en la zona de las puertas, razón por la cual esta tecnología no es efectiva en sistema de transporte público altamente estresados, como es el caso de Santiago.
- GPS (Global Positioning System) ó AVL (Automated Vehicle Location). Datos obtenidos de las emisiones de la posición de los buses. Las formas en que se recopila esta información son dos: la forma más habitual es registrar la posición emitida por el aparato con una periodicidad dada. Una forma alternativa de recopilar las posiciones de los buses consiste en emitir la hora de pasada de un bus en puntos determinados de la ruta (por ejemplo, en los paraderos).
- GIS (Geographic Information System). Información relativa a las entidades que componen el sistema de transporte público (tales como paraderos o trazados de los servicios) y/o del entorno (como el uso del suelo) que debe ser levantada por el operador o la oficina de transporte.

En el Capítulo 3 se realizará una descripción más detallada de las fuentes de datos pasivos disponibles en la ciudad de Santiago. A pesar de que la información anteriormente descrita permite calcular una amplia gama de indicadores con gran precisión, para el cálculo de algunos de ellos las fuentes descritas anteriormente pueden ser insuficientes, por lo que es recomendable (o absolutamente necesario en algunos casos) recolectar información de forma exclusiva para tales fines. Estos datos se dividen en dos grupos: el primero está orientado a conseguir información objetiva del sistema, para ello se utilizan encuestas de tiempo de viaje (time checks), supervisores en terreno o pasajeros ocultos; por otro lado, los datos orientados a medir percepciones se obtienen mayoritariamente a partir de encuestas de calidad de servicio.

La calidad de servicio puede ser medida o percibida. En el caso de que se requieran mediciones objetivas de la calidad de servicio, basta con definir indicadores basados en atributos relevantes y medirlos con un nivel de desagregación adecuada, el resultado de lo anterior corresponde a los indicadores objetivos. Por otro lado, si se desea medir la percepción de los usuarios (que traen como resultado los indicadores subjetivos), el espectro de posibilidades aumenta: la primera es a través de una medición directa, que consiste en pedirle a los usuarios que evalúen directamente (por ejemplo, con una nota) la calidad de servicio y/o los atributos considerados importantes para su experiencia de viaje. Eboli y Mazzulla (2012) advierten que las principales desventajas de medir indicadores de esta manera son la fuerte subjetividad de las opiniones de los usuarios, además de que si no se muestrea de forma correcta se puede sub o sobreestimar la percepción de aquellas personas que no usan el sistema de transporte, o de aquellos que no son usuarios habituales.

Otra alternativa es realizar una medición indirecta, que consiste en obtener la valoración del servicio y/o los atributos a partir de las decisiones que los usuarios tomarían enfrentados a distintos escenarios. Para ello, algunos autores (como Ortúzar et al., 1991 y Hensher et al.,

2003) proponen enfoques basados en encuestas de preferencias declaradas para obtener tales valoraciones, o bien mezclas entre preferencias declaradas y preferencias reveladas (Eboli y Mazzulla, 2010). La gran ventaja de estos métodos es que no sólo sirven para medir calidad de servicio, sino que además permiten estimar la importancia relativa de cada uno de los atributos en la misma; sin embargo estas encuestas pueden ser particularmente costosas y difíciles de implementar.

#### 2.1.4. Atributos relevantes

Los atributos relevantes para medir calidad de servicio se pueden determinar de dos maneras. La primera y más intuitiva es observar aquellos atributos que influyen en la percepción de satisfacción de los usuarios; bajo este primer enfoque la literatura relativa a los factores que influyen en la satisfacción experimentada por los usuarios es extensa (Ortúzar et al., 1997; dell'Olio et al., 2010; Hensher et al., 2003; Tyrinopoulos y Antoniou, 2008; Yañez et al., 2010 y Donoso et al., 2013 por citar algunos) en la cual mediante diversas técnicas estadísticas obtienen el conjunto de atributos relevantes y también la valoración relativa para el usuario de cada una de ellas, lo que permite saber cuáles son las más importantes.

La segunda fuente está dada por los factores que determinan la elección de la ruta por parte de los usuarios (dell'Olio et al., 2011, Raveau et al., 2014, entre otros). En este sentido, Donoso et al. (2013) señalan que la valoración relativa de los factores que influyen en la elección de ruta no es necesariamente la misma que se obtiene al medir la satisfacción de los usuarios. Esto se debe a que, a pesar de que en ambos enfoques se trabaja a partir de la misma función objetivo (en este caso, la utilidad), la variabilidad de los atributos a evaluar es distinta al medir satisfacción y elección de ruta respectivamente, cuando un atributo presenta poca variabilidad es difícil para el usuario valorar relativamente ese atributo del viaje con respecto a otros más variables. Sin perjuicio de lo anterior, los atributos que sistemáticamente aparecen como relevantes para medir calidad de servicio son los siguientes:

- Costo.
- Tiempo de viaje en bus.
- Tiempo de espera.
- Frecuencia.
- Nivel de ocupación de los vehículos.
- Posibilidad de viajar sentado.
- Confiabilidad en el tiempo de espera y de viaje en el bus.
- Número de transbordos.

Otros atributos relevantes en la percepción de calidad de servicio son:

- Tiempo de caminata, en el acceso y en el egreso.
- Condiciones de la caminata, pues se ha evidenciado que los usuarios perciben de peor manera las caminatas (ya sean de acceso, egreso o transbordo) que se realizan en subida que aquellas que se realizan en bajada, que a su vez son peor percibidas que aquellas hechas a nivel. También valoran positivamente el hecho de tener caminatas asistidas (con escaleras mecánicas, por ejemplo).

- Comodidad, que engloba aspectos como la calidad de los asientos, cantidad y cercanía de pasamanos, presencia de aire acondicionado y/o calefacción, piso bajo, rampas para discapacitados o escaleras mecánicas en lo puntos de transbordo, entre otros.
- Riesgo de accidentes, que considera el riesgo de sufrir colisiones con otros vehículos y también el riesgo asociado a lesiones dentro del bus por manejo brusco por parte del conductor.
- Riesgo de robos, tanto dentro del bus como en el trayecto desde el origen y hacia el destino.
- Infraestructura en paraderos, ítem que incorpora factores tales como la existencia de refugios en los paraderos y la facilidad de acceso a ellos.
- Información disponible, tanto en paraderos, como en estaciones de transbordo y la que se puede encontrar en línea. Los usuarios valoran que la información sea confiable, de fácil acceso y comprensible.
- Actitud del chofer.
- Limpieza del bus.
- Estructura tarifaria y modalidad de pago, pues en general los usuarios valoran de forma positiva aquellos sistemas con estructuras tarifarias sencillas de entender, y con medios de pago basados en tarjetas sin contacto y/o pago extravehicular.

#### 2.1.5. Segmentación de usuarios

No todos los usuarios valoran los atributos de igual manera a la hora de evaluar la calidad de servicio (Ortúzar et al., 1997; dell'Ollio et al., 2011; Raveau et al., 2014). Algunos criterios para clasificarlos son:

- Ingreso, pues en general los usuarios de menores ingresos tienen una mayor valoración relativa del costo que del tiempo de viaje, situación que se invierte a medida que el ingreso aumenta. Por otro lado, para los usuarios de más bajos ingresos, los dos atributos mencionados anteriormente son por lejos los más importantes a la hora de evaluar el servicio de transporte público, y que a medida de que el ingreso aumenta factores como la comodidad, la seguridad y la limpieza comienzan a adquirir mayor relevancia.
- Intensidad de uso, ya que los viajeros esporádicos le dan mayor importancia a la comodidad, la limpieza del bus y a la amabilidad del conductor.
- Hora de viaje, debido a que los viajeros de hora punta colocan mayor importancia al tiempo de viaje y al costo respecto a la valoración que se tiene en un horario no punta. Y dentro del primer punto, los viajeros poseen valoraciones diferentes de algunos atributos en punta mañana y punta tarde. Por ejemplo, en la punta tarde los usuarios sacrifican tiempo de viaje y puntualidad por mayor comodidad.
- Horario de llegada a destino, pues aquellos usuarios que tienen una hora de llegada fija al lugar de destino le entregan una alta valoración a la confiabilidad en el tiempo de viaje, a pesar de que puedan demorarse más. Cabe destacar que el propósito de un viaje (que intuitivamente sería una forma de segmentar a los distintos usuarios) se puede armar como una combinación de la hora del viaje y la necesidad de tener una hora de llegada fija.
- Tipo de usuario, donde factores como el género y el grado de movilidad influencian los atributos considerados como relevantes. En general las mujeres, usuarios de

mayor edad y con movilidad reducida le brindan mayor importancia a factores como la comodidad, la limpieza, la atención del chofer y el tiempo de caminata.

#### 2.1.6. Cálculo de indicadores con datos pasivos

Con las tecnologías descritas en la Sección 2.1.3, la gama de indicadores a calcular es extensa. La precisión y el nivel de desagregación con el que se pueden obtener los indicadores depende principalmente de:

- El tipo de datos disponibles enumerados anteriormente en la Sección 2.1.3.
- El nivel de detalle de los datos disponibles. Por ejemplo, las posiciones GPS de los buses pueden ser guardadas cada cierto intervalo de tiempo o bien cada vez que se realiza una transacción; a su vez las transacciones pueden ser clasificadas por el servicio en el cual fue realizada o el tipo de tarjeta.
- El porcentaje de uso de las tarjetas. A mayor porcentaje de viajes que se registren utilizando tarjetas inteligentes con respecto al total, menores son los sesgos en los indicadores obtenidos.
- Si la tarjeta es transferible o no, y si ésta es personalizada, lo que permite incorporar variables demográficas al análisis.
- Si el lugar y la hora de las subidas y/o bajadas se identifica con exactitud. En algunos sistemas (como Londres, Seúl o el Metro de Valparaíso) se debe validar en ambos puntos, por lo que la estimación de subida y bajada es muy exacta. En otros sistemas (como Santiago y la mayoría de los sistemas donde se paga con tarjeta) sólo se valida al subir, esto exige estimar el punto de bajada de cada etapa del viaje para poder reconstruir el viaje completo, y la precisión de los indicadores obtenidos tiene directa relación con la estimación de las bajadas. Finalmente, existen sistemas donde tanto la información del paradero de subida como del de bajada se desconoce, por lo que sólo se pueden obtener indicadores agregados de la demanda.

En la actualidad, muchas oficinas de transporte calculan indicadores de su operación. Examinando los indicadores utilizados por sistemas masivos a lo largo del mundo, tales como los de Nueva York (MTA, 2013), Chicago (CTA, 2013), Londres (TfL, 2012), Singapur (PTC, 2013), Hong Kong (MTR, 2012) y Sydney (New South Wales State Transit, 2013) se aprecia que hay aspectos que se miden de forma consistente entre las distintas agencias, entre los cuales destacan:

- Cumplimiento de frecuencia
- Regularidad entre salidas
- Tasa de ocupación
- Fallas mecánicas por veh-km
- Tasa de accidentes por veh-km
- Tasa de asaltos por veh-km
- Tasa de reclamos no respondidos, en un umbral de tiempo

Otros indicadores medidos por las oficinas de transporte estudiadas son la tasa de falla de rampas para discapacitados y ascensores, edad promedio de la flota, limpieza del bus, caminata máxima de acceso a un bus, número de etapas entre viajes de distintas zonas de la ciudad, tasa de falla de los boletos/máquinas vendedoras de boletos, temperatura dentro de los trenes/estaciones y el porcentaje de pruebas de drogas/alcohol positivas de choferes, entre otros. Como se puede apreciar, los indicadores calculados por las agencias de

transporte están orientadas tanto al aspecto operacional como a la calidad de servicio ofrecida a los usuarios; enfocándonos en esta última, TRB (2003b) define los siguientes aspectos como clave a la hora de evaluar calidad de servicio:

- Frecuencia
- Horas de servicio
- Cobertura del servicio
- Tasa de ocupación
- Regularidad
- Velocidad del transporte público vs automóvil

Cabe destacar que muchos de los indicadores enumerados anteriormente no pueden calcularse a partir de los sistemas de recolección pasiva de datos. Sin embargo, para aquellos indicadores que sí pueden ser calculados, esta fuente de información resulta de gran utilidad pues aumenta significativamente la disponibilidad en espacio y tiempo de estas observaciones respecto a que se obtienen con los métodos tradicionales de medición, a un costo mucho menor.

La literatura reporta cálculo de indicadores de calidad de servicio con fuentes pasivas de datos. Entre los más importantes destacan los aportes de Bertini y El-Geneidy (2003) que calcularon indicadores de frecuencia, regularidad y accesibilidad, además de perfiles de carga para el sistema de transporte de la ciudad de Portland (Estados Unidos). Esta información es también calculada por Trépanier et al. (2009) en la ciudad de Gatineau (Canadá). Bagchi y White (2005) calcularon indicadores de tasas de viaje, de transbordos y de tasas de fuga en dos sistemas de transporte de Inglaterra para sistemas donde sólo se valida en la subida; también Utsunomiya et al. (2006) calcularon distancias de acceso al sistema además de examinar los patrones de viaje de los usuarios. En sistemas donde se valida en la subida y en la bajada, la gama de indicadores a calcular aumenta. Park et al. (2008) calcularon indicadores tales como la tasas de transbordo y tiempos de viaje para la ciudad de Seúl (República de Corea), los cuales Jang (2010) complementa determinando puntos de transbordo críticos en la ciudad.

La experiencia local también reporta mediciones de indicadores de calidad de servicio con datos pasivos. A partir del cruce de las transacciones efectuadas con la tarjeta Bip! (tarjeta inteligente que constituye el más importante medio de pago para los buses en el sistema Transantiago, con un uso aproximado en el 97% de las etapas de viaje) con las señales GPS de los buses, Beltrán et al. (2013) obtienen mediciones de velocidad comercial de los buses, tiempos de viaje de los usuarios y tiempos de espera en paraderos. A pesar del gran nivel de detalle temporal y espacial de los resultados obtenidos, una limitación de ellos es que no se realiza ningún procedimiento de filtrado de datos erróneos, por lo que en algunos casos los resultados obtenidos son poco razonables, como se aprecia en la Figura 2.3.

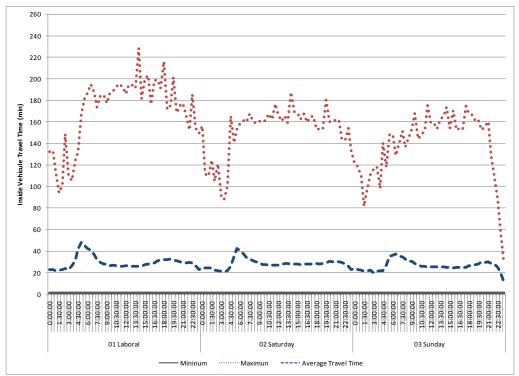


Figura 2.3: Tiempo de viaje, por media hora de inicio y tipo de día.

Fuente: Beltrán et. al (2013)

En la Figura 2.3 se muestra el tiempo de viaje promedio y máximo para una semana de estudio, desagregado por tipo de día y media hora de subida. Al observar en detalle, se aprecia que existen viajes con duración mayor a 3 horas y media, lo que se considera poco razonable para la ciudad de Santiago, puesto que los tiempos estimados no incorporan caminata de acceso, espera inicial ni tiempo de egreso, además que en la ciudad de Santiago no es tan grande ni la congestión tan severa para tener tiempos de viaje de esa magnitud. Los autores reconocen este hecho e indican que la metodología de separación etapa — viaje se encontraba en desarrollo a la fecha de publicación del artículo.

#### 2.2. Regularidad

Como fue descrito en la Sección 2.1.4, uno de los aspectos que más influyen en la percepción de la calidad de servicio (y en algunos casos como en dell'Olio et al., 2011, el más importante) ofrecida a los usuarios es la confiabilidad, la cual es definida por Abkowitz (1978) como la invariabilidad de los atributos que influencian las decisiones de los usuarios y de los proveedores del servicio. En general, al hablar de confiabilidad se habla del tiempo de viaje en sus distintas componentes (espera, arriba del bus o transbordo), sin embargo esta definición se puede extender a otros atributos tales como la confiabilidad de encontrar asiento en un bus o en la compra de boletos, entre otros. Para efectos de esta tesis, al hablar de la invariabilidad en los tiempos de viaje y/o espera nos referiremos a regularidad, mientras que para el resto de los aspectos seguiremos hablando de confiabilidad.

Las causales de la falta de regularidad en el tiempo de espera y viaje están fuertemente influenciadas por los factores que determinan el tiempo de expedición de los buses. En este sentido, Abkowitz y Engelstein (1983), Strathman y Hopper (1993), Lomax et al. (2003) y TRB (2003a) reconocen que la variabilidad de los tiempos de viaje es causada por una serie de factores, de los cuales algunos están dentro del rango de acción del operador y otros no.

Entre las causales reportadas, se pueden mencionar aquellas relacionadas con las características de la vía (número y espaciamiento de paraderos, número y tipo de intersecciones, derecho de vía, congestión, estado de la vialidad), con las características del viaje en sí mismo (longitud, punto del recorrido donde se inicia, si hay incidentes durante el viaje y las condiciones meteorológicas de momento), con la operación del servicio (regularidad en su despacho y su control en la ruta), con el nivel de mantenimiento de los buses, la experiencia de los conductores (y la factibilidad que tengan para cumplir el itinerario) y la estructura de la demanda.

Una alta variabilidad en el tiempo de pasada de los buses tiene efectos negativos tanto para los operadores como para los usuarios. Desde el punto de vista de los operadores, ofrecer servicios de alta confiabilidad les reporta beneficios por dos motivos diferentes: en primer lugar, empíricamente se ha demostrado que cuando las llegadas de los buses a los paraderos son constantes los pasajeros se reparten de forma más homogénea en ellos (Strathman et al. 2003). Cuando existen líneas comunes esto trae como consecuencia una mayor eficiencia en el uso de los recursos ya que una línea en particular puede llevar la misma cantidad de gente con menos buses, o visto de otra forma, se puede llevar más gente (y por ende hay una mayor recaudación) con la misma flota. Por otro lado, dado que la confiabilidad es un atributo altamente valorado por los usuarios, a mayor confiabilidad eventualmente se podrá atraer nuevos usuarios y por ende tener una mayor afluencia de pasajeros, lo que redunda en mayores ingresos para los operadores.

Para los usuarios, los efectos de la falta de regularidad son algo más evidentes. Según Bates et al. (2001), una alta confiabilidad en el tiempo de viaje se valora de dos maneras distintas: por un lado los usuarios sienten un desagrado intrínseco por la variabilidad, lo que impacta en la valoración que tienen por el servicio de transporte. Por el otro, cuando existe poca variabilidad los usuarios pueden programar de mejor manera su hora de salida puesto que con poca incertidumbre respecto del tiempo total de viaje la holgura requerida para asegurarse llegar a tiempo al destino disminuye, lo que es particularmente notorio en servicios de baja frecuencia. Una consecuencia de lo anterior es que un usuario podría alterar su estrategia de viaje si es que tiene un tiempo de viaje más regular.

La literatura muestra dos enfoques principalmente para modelar la variabilidad del tiempo de viaje desde la perspectiva microeconómica: el primero consiste en los modelos de programación (o scheduling en inglés) y el segundo en los modelos de forma reducida. En el primer enfoque se asume que los viajeros poseen una hora deseada de llegada y por ende buscan salir a una hora tal que los haga llegar a su destino exactamente a esa hora, el no cumplimiento de esta condición induce desutilidades tanto por llegar adelantado como por llegar atrasado, las cuales deben ser incorporadas al desagrado por el tiempo consumido en el viaje para efectos de modelar la decisión del usuario. Por otro lado, en el segundo enfoque se asume que la utilidad del usuario está dada por el tiempo de viaje esperado y por la variabilidad del mismo. Como medida del tiempo de viaje esperado se usa principalmente la media, mientras que como medida de la variabilidad se ha usado principalmente la desviación estándar (Noland y Small, 1995) y el retraso promedio con respecto a la hora programada de llegada (Bates et al., 2001). Lam y Small (2001) han encontrado que la percepción del tiempo esperado de viaje puede quedar mejor representada por la mediana que por la media, y que la percepción de la variabilidad puede quedar mejor representada por el tiempo de un percentil extremo (usualmente se usa el percentil 90 ó 95) que por la varianza, lo cual significa que la percepción de variabilidad se vería altamente afectada por episodios de tiempos de viaje muy por encima de lo normal.

Para efectos de análisis costo – beneficio el enfoque más utilizado son los modelos de forma reducida, sin embargo estos modelos tienen como gran desventaja que la valoración de la variabilidad en el tiempo de viaje obtenidas al calibrar los modelos dependen de la distribución del tiempo de viaje específica de esa situación, por lo cual no es posible transferir los valores obtenidos de un contexto a otro. Investigación más reciente ha concluido que bajo ciertas condiciones un modelo de forma reducida puede ser derivado a partir de un modelo de programación subyacente (Fosgreau y Kalström, 2010), lo cual es útil puesto que en esas condiciones los parámetros estimados de los modelos de programación sí son transferibles. Sin embargo, Börjesson et al. (2012) al estimar ambos modelos en un experimento de preferencias declaradas obtuvieron como resultado que la valoración de la variabilidad en los modelos de forma reducida era significativamente mayor que en el modelo de programación subyacente, lo cual sugiere que el modelo de programación no lograría capturar toda la desutilidad producto de la variabilidad en los tiempos de viaje.

La valoración para los usuarios de la variabilidad en el tiempo de espera desde un enfoque microeconómico ha sido mucho menos estudiado que el del tiempo de viaje, presumiblemente porque se asume que los modelos utilizados para tiempo de viaje podrían ser eventualmente transferidos para estudiar el tiempo de espera. Sin embargo, al estudiar el impacto del tiempo de espera en la decisión de los usuarios hay que tener en cuenta que ésta se encuentra condicionada a la frecuencia del servicio. Cuando un servicio es de alta frecuencia los usuarios llegan al paradero de manera independiente a la de los buses de manera de llegar a tiempo al destino la mayor cantidad de veces posible. Siguiendo el enfoque antes mencionado, Furth y Muller (2006) postulan que los usuarios buscan minimizar el tiempo de espera equivalente, que se define como:

$$W_{\rm eq} = E[W] + \frac{b}{a} W_{\rm POT} \tag{2.1}$$

Donde E[W] es la esperanza del tiempo de espera y  $W_{\rm POT}=W_{95}-E[W]$  es el tiempo de espera potencial, donde  $W_{95}$  es el percentil 95 del tiempo de espera y a,b son las valoraciones subjetivas del tiempo de espera en paradero y potencial, las cuales si se miden en unidades de tiempo en vehículo por tiempo de espera tendrían por valores relativos esperados a>b. Al respecto, hay que hacer notar la interpretación del tiempo de espera potencial (definido por otros autores como el tiempo de holgura), que es el tiempo extra ocupado en la peor espera del mes y que es aquella que el usuario incorpora de forma permanente en su programación para evitar llegar atrasado a su destino. La razón por la cual  $W_{\rm POT}$  el usuario la penaliza de menor forma que la espera habitual es porque en los múltiples casos en los que se espera menos que  $W_{95}$ , el tiempo correspondiente a esta componente se utiliza en el destino, lo cual teóricamente lo hace más agradable para el usuario que la espera en paradero.

Por otro lado, en el contexto de servicios de baja frecuencia lo habitual es que las horas de pasada de los buses por los paraderos están definidas de antemano y son informadas a los usuarios, por ende una fracción importante de los pasajeros sabe a qué hora debe llegar al paradero. Luego, la estrategia de los usuarios para llegar al paradero difiere de la de los

servicios de alta frecuencia, y bajo este escenario Furth y Muller (2006) distinguen cuatro componentes en el tiempo de espera que enfrentan ellos:

- Tiempo de exceso en paradero: A pesar de que las pasadas están programadas, éstas podrían ocurrir antes o después de la hora estipulada. Dado que el castigo por llegar atrasado al paradero es fuerte (esperar un intervalo completo), los pasajeros deciden llegar al paradero con una cierta anticipación para tener certeza de no perder el bus. Se define como V a la diferencia entre la hora de pasada real y la programada, luego la esperanza del tiempo en exceso queda definido como:

$$W_{EXC} = E[V] - V_A \tag{2.2}$$

Donde  $V_A$  corresponde al percentil de V en el cual el usuario decide llegar al paradero. Como este percentil se puede manejar a voluntad, Furth y Muller (2006) sugieren que el usuario habitualmente llegaría en el percentil 2, lo cual significa que el pasajero llegaría atrasado al paradero a lo sumo una vez en 50 viajes.

- Tiempo de espera potencial: Similar al del caso de alta frecuencia. Se define como:

$$W_{POT} = V_{95} - E[V] (2.3)$$

- Incomodidad de la programación: Es una forma de espera que representa la incomodidad de los pasajeros por estar limitados a usar los servicios en las horas estipuladas por la programación, en desmedro de la hora preferida por el usuario. Se denota como  $W_{IP}$  y tiene valores entre 0 y el intervalo del servicio. Se diferencia del tiempo de espera potencial debido a que el usuario conoce este tiempo de antemano y por ende, puede asignarle usos alternativos con certeza.
- Costo de sincronización: Combina diversas fuentes de desagrado relacionadas con la necesidad de los pasajeros de ajustarse a un horario. El primero es el estrés de organizar el día en función de una programación dada. El segundo es el tiempo que transcurre entre la hora real llegada al paradero y la hora deseada, la cual se asumirá igual a  $V_2$ . El tercero tiene que ver con el estrés propio de preocuparse de perder el bus, y finalmente el cuarto tiene que ver con la espera de un intervalo entero en aquellos casos en los cuales uno pierde el bus. Los autores proponen la siguiente expresión para el costo de sincronización:

$$CS = 2 + 0.05h (2.4)$$

Donde CS se mide en minutos, y h es el intervalo.

De esta manera, una expresión para el tiempo de espera equivalente en el contexto de servicios de baja frecuencia queda dado por:

$$W_{eq} = \alpha \cdot W_{EXC} + \beta \cdot W_{POT} + \gamma \cdot W_{IP} + CS$$
 (2.5)

Los autores proponen valores de 1.5 para  $\alpha$ , 0.75 para  $\beta$  y 0.6 para  $\gamma$ . De esta forma, las expresiones (2.1) y (2.5) son medidas de tiempo de espera que incorporan el efecto de la variabilidad desde el punto de vista del usuario.

#### 2.3.1 Indicadores de regularidad

Los indicadores de regularidad son interesantes de estudiar en sí mismos debido a que no hay un único indicador que logre englobar por completo la percepción de los pasajeros con respecto a este aspecto de la experiencia de viaje, lo cual se ve reflejado en la variedad de indicadores de regularidad utilizados por las distintas oficinas de transporte a lo largo del mundo. Esto sucede por dos razones: la primera es que evidencia concluyente de los factores que influyen en la percepción de regularidad es relativamente reciente, y la segunda (en el caso de la regularidad en la espera) es que la decisión del usuario está condicionada por la frecuencia del servicio a utilizar.

Para medir regularidad del tiempo de espera (aunque la mayoría son trivialmente extensibles al tiempo de viaje) existen tres grandes familias de indicadores: la primera son los indicadores basados en puntualidad, que consisten en medir el porcentaje de buses que pasan por un paradero a la hora indicada por los programas. Una versión análoga para servicios de alta frecuencia es el porcentaje de intervalos que son menores a un umbral predefinido de antemano que usualmente es función del intervalo programado. Una propuesta de umbral es acotar por el intervalo programado más una cantidad fija de tiempo y la otra es fijar el umbral por un porcentaje mayor al 100% del intervalo programado (Trompet et al. 2011). La ventaja de este tipo de indicadores es que es fácil de implementar y de interpretar por reguladores y operadores, su principal problema es que no tienen directa relación con la espera de los usuarios (aunque indirectamente acotan la espera de los pasajeros si es que se cumplen en la práctica y los buses tienen capacidad). Por otra parte, si el mecanismo de penalización contempla castigar por el porcentaje de intervalos mayores a un umbral, el operador puede programar intervalos (y por ende inducir esperas) que sobrepasan por mucho el umbral definido sin que reciba un castigo extra respecto de sobrepasar por poco el umbral; en el caso descrito anteriormente excederse en 10 minutos del umbral sería lo mismo que hacerlo en un minuto para efectos del cálculo del indicador.

La segunda familia de indicadores incorpora aquellos factores que los usuarios relacionan con el concepto de variabilidad. La medida más simple de calcular corresponde a la desviación estándar de los intervalos,  $\sigma(h^{OBS})$ , o bien al coeficiente de variación (la razón entre desviación estándar de los intervalos observados y el promedio de los mismos). Una sofisticación de la idea anterior es considerar la desviación estándar de la diferencia entre los intervalos observados y los programados,  $\sigma(h^{OBS}-h^{PROG})$ , la ventaja de realizar esto es que empíricamente se ha apreciado que esta variable distribuye aproximadamente normal mientras que el intervalo observado no lo hace (Trompet et al., 2011). Finalmente, otra forma de cuantificar el efecto de la variabilidad en los tiempos de pasada es observando su efecto directo en los tiempos de espera de los usuarios; Osuna y Newell (1972) demuestran que bajo el supuesto de llegadas uniformes a los paraderos (supuesto razonable para operación de alta frecuencia), el tiempo de espera queda caracterizado en función del promedio de los intervalos y del coeficiente de variación de los mismos a través de la expresión (2.6):

$$E[W] = \frac{\overline{h}}{2} \left( 1 + CV^2 \right) \tag{2.6}$$

Dónde:

E[W]: Esperanza del tiempo de espera.

*h* : Intervalo medio observado.

CV : Coeficiente de variación de los intervalos.

A partir de (2.6) se desprende que hay una componente de la espera inherente al modo de funcionamiento del transporte público (que es igual a  $\frac{\overline{h}}{2}$  bajo el supuesto anterior), y otra componente producto de la variabilidad de las pasadas de los buses (igual a  $E[W]-\frac{\overline{h}}{2}$ ), la

cual se denomina tiempo de espera en exceso (TEE). Este indicador es utilizado en la ciudad de Londres (TfL, 2013) para evaluar la regularidad de sus servicios, donde a cada servicio se le entrega un valor de TEE máximo a alcanzar variable entre 0,5 y 2 [min] dependiendo de las características del mismo.

Si bien esta segunda familia de indicadores está más ligada a los mecanismos de decisión de los usuarios, su principal problema es que aún no es suficientemente sensible a los intervalos (y por ende esperas) demasiado largas. Un ejemplo de esto se ilustra en la Tabla 2.1, donde se compara el comportamiento de E[W],  $W_{90}$  y  $W_{95}$  para un conjunto de intervalos simulados, que se asume distribuyen normal centrado en 1 para distintos valores del coeficiente de variación (CV). Furth y Muller (2006) concluyen que al pasar de 0 a 0,45 el valor de CV, el valor de E[W] aumenta en un 20%, mientras que  $W_{90}$  aumenta en un 31% y  $W_{95}$  en un 44%; es decir, a medida que aumenta la variabilidad de los intervalos las esperas extremas crecen de una manera más agresiva que el tiempo de espera en exceso, y mientras más extremo el percentil que se busca observar más aumenta el valor con la variabilidad.

Tabla 2.1: Indicadores de regularidad para distintos valores de CV, bajo distribución normal de intervalos.

CV	0	0,15	0,25	0,35	0,45
E[W]	0,5	0,51	0,53	0,56	0,6
$W_{90}$	0,9	0,93	0,99	1,08	1,18
$W_{95}$	0,95	1,02	1,12	1,24	1,37

Fuente: Adaptado de Furth y Muller (2006).

Por último, la tercera familia de indicadores es aquella que utiliza los percentiles extremos del tiempo de espera. El objetivo de medir regularidad de esta forma es precisamente examinar y acotar las peores experiencias de los usuarios, que como se explicó anteriormente determinan la percepción de variabilidad de ellos. Lomax et al. (2003) recomiendan medir esto a través del *tiempo de holgura*, el cual fue definido en (2.1) de manera de llegar tarde al destino a lo sumo una vez al mes en día laboral.

Obtener los percentiles de los tiempos de espera es una tarea no trivial debido a que generalmente sólo se poseen mediciones de los intervalos; Furth y Muller (2006) describen una metodología para obtener los percentiles de los tiempos de espera en función de los intervalos observados, bajo el supuesto de llegadas uniformes de los usuarios al paradero y que los buses no se llenan. Los indicadores se construyen acotando la espera extrema por un cierto umbral. Por ejemplo, en el sistema de París se exige que  $W_{90}$  sea a lo sumo el intervalo más dos minutos en el caso de los buses y  $W_{98}$  debe ser a lo sumo el intervalo más dos minutos en el caso de metro.

La mayoría de los indicadores fueron descritos en el contexto del tiempo de espera, sin embargo la mayoría de ellos también pueden ser utilizados para evaluar la regularidad del tiempo de viaje. En la Tabla 2.2 se muestra un resumen de los indicadores descritos en la presente sección indicando si es posible utilizar cada uno de estos indicadores para tiempos de viaje y/o de espera, a su vez indicando si es aplicable para esquenas de alta o baja frecuencia:

Tabla 2.2: Usos potenciales de los indicadores de regularidad.

Indicados	Tiempo Espera		Tiempo	
Indicador	Baja f	Alta f	Viaje	
Puntualidad	Sí			
Regularidad		Sí		
$\sigma({ m h}^{ m OBS})$		Sí	Sí	
$\sigma(h^{OBS}-h^{PROG})$		Sí	Sí	
Coeficiente de Variación		Sí	Sí	
Tiempo de espera en exceso		Sí		
Tiempo de Holgura		Sí	Sí	

De la tabla anterior se puede observar que no todos los indicadores son recomendables para medir los distintos aspectos de la experiencia de viaje de la persona. En el caso de la regularidad en el tiempo de espera, el esquema de funcionamiento del sistema para un servicio de alta frecuencia hace que sólo medir la puntualidad sea representativo de su experiencia de viaje, mientras que bajo un esquema de funcionamiento de alta frecuencia la puntualidad se hace menos importante puesto el usuario no se programa para llegar a una hora determinada al paradero, con lo cual el resto de las medidas antes mencionadas logran reflejar la percepción del usuario. Por otro lado, para el tiempo de viaje una buena parte de los indicadores mencionados no tienen sentido puesto que requieren para su cálculo un valor dado por condiciones de funcionamiento ideales (que en el caso del tiempo de espera viene por una operación perfectamente regular), el cual para el tiempo de viaje no existe.

A pesar de que aún no hay un acuerdo sobre un único indicador para medir regularidad, se han realizado algunos análisis comparativos. Lomax et al. (2003) realizaron una comparación entre medidas de regularidad para el tiempo de viaje con datos de 20 sistemas de transporte en Estados Unidos, luego de lo cual recomendaron el uso de tres indicadores: coeficiente de variación, tiempo de holgura e índice de sufrimiento (la diferencia entre el tiempo promedio de los peores viajes y tiempo promedio de los viajes), los cuales para los datos estudiados resultaron ser consistentes entre sí a nivel de ciudad y corredores en estudio. Por otro lado,

Trompet et al. (2011) utilizan datos de 12 sistemas de transporte masivos a nivel mundial suscritos al International Bus Benchmarking Group (IBBG) para comparar 4 indicadores de regularidad de tiempo de espera para servicios de alta frecuencia (TEE, desviación estándar de la diferencia entre intervalo real y programado y regularidad en sus dos modalidades). Los autores recomiendan utilizar el TEE como medida de regularidad para la espera, sin encontrar una consistencia entre este indicador y los otros utilizados en la comparación.

#### 2.3. Comentarios y conclusiones

En el presente capítulo se ha realizado una revisión de los indicadores de calidad de servicio junto con un análisis particular de los indicadores de regularidad y una descripción de las distintas fuentes de datos requeridas para ser calculado. Actualmente, la información disponible en Santiago para el cálculo de indicadores proviene de tres de las cuatro fuentes pasivas (no existen contadores de pasajeros en los buses de Santiago por lo que la tecnología APC no está disponible). El volumen de información es suficiente y el nivel de desagregación es adecuado para obtener indicadores de calidad de servicio, siendo los indicadores relacionados con tiempo de viaje, tiempo de espera, frecuencia y regularidad aquellos donde se pueden aprovechar mejor. A pesar de las ventajas que representa esta nueva fuente masiva de datos pasivos, éstos no son reemplazo de los métodos clásicos de muestreo sino más bien un complemento, especialmente para aquellos datos que logran individualizar al viajero, sus características personales y sus patrones de viaje. Esto es particularmente relevante si se quiere medir percepciones, a pesar de que se podrían enriquecer los resultados con los datos pasivos de forma de establecer la relación entre las percepciones y lo que efectivamente ocurre como experiencia de viaje.

En la revisión se ha colocado especial énfasis en el cálculo de índices de regularidad. Ha quedado de manifiesto la importancia que los usuarios le dan a este atributo y lo poco explorado que había sido, especialmente debido a requerimientos de información (ya que precisamente la variabilidad es consecuencia de las numerosas repeticiones de un fenómeno). Los datos pasivos se sobreponen a este problema y la literatura muestra cálculos recientes de este tipo de indicadores para sistemas masivos. Los sistemas que pueden obtener indicadores de regularidad masivos y creíbles, deberían usarlos como piedra angular para medir la calidad de servicio en el transporte público.

Adicionalmente, hay tres aspectos sobre los cuales la literatura habla poco y que implicaría una mejora en los indicadores de regularidad: el primero es aquel relacionado con la existencia de líneas comunes, puesto que la regularidad es usualmente medida a nivel de servicio, pero en la ciudad de Santiago es habitual el caso donde a un usuario le pueden servir varios servicios en alguna de las etapas de su viaje. La complejidad de abordar este punto radica en que la regularidad vista desde el punto de vista del usuario no es directa de calcular a partir de la regularidad de cada servicio por separado y se sospecha que el problema traería una alta complejidad computacional asociada, donde el proceso crítico sería seleccionar el conjunto de servicios factibles para un usuario, el cual no sólo es función del paradero de subida, también depende del de bajada.

El segundo aspecto relevante (en particular, para los tiempos de espera) tiene que ver con el supuesto de que siempre se podrá abordar el primer bus que pasa. Si un bus va demasiado lleno es poco probable que los pasajeros puedan tomarlo, por lo que la espera que experimentan es mayor. Este comportamiento se denomina efecto de congestión en tiempo

de espera y no es recogido por los indicadores reportados en la literatura, lo cual es un tema que en sistemas altamente exigidos como el de Santiago tiene alta relevancia. Cabe notar que éste no es el único motivo por el cual un bus podría no detenerse en un paradero; saltos de paradas (stopskipping) como una estrategia para combatir el bunching o la desidia del conductor tienen el mismo efecto sobre la espera de los usuarios, y por ende en la regularidad que los usuarios perciben.

El tercer y último tema es definir cuáles indicadores de regularidad debe medir una oficina de transportes (en especial la de Santiago). El conjunto escogido debe rescatar aquellos aspectos relevantes en la percepción de los usuarios de regularidad, especialmente lo relativo a no permitir esperas demasiado largas. Además los indicadores deben ser factibles de calcular masivamente y deben incentivar un esquema de operación en la calle bien definido para las empresas y especialmente para los conductores. Finalmente, es deseable que los indicadores a utilizar sean de fácil interpretación y comunicabilidad tanto para autoridades como para la ciudadanía en general, aunque esto no debe estar por delante de las otras cualidades descritas anteriormente. Al respecto, es interesante notar que si hay alta correlación y consistencia relativa entre varios indicadores de regularidad pero uno de ellos es significativamente más fácil de calcular, implementar o interpretar que los demás sería recomendable utilizar sólo ese indicador, siempre y cuando obviar los demás no generen incentivos perversos que conduzcan a una operación no deseable para los usuarios. Esta tarea es relevante de realizar porque en la literatura no existe una comparación de indicadores de regularidad que contemple todos los descritos en la presente revisión.

# 3. Descripción de los datos disponibles

Transantiago es el nombre del sistema de transporte público de Santiago que empezó a operar en febrero del año 2007. El sistema posee integración tarifaria completa en los transbordos bus - bus y pagando un pequeño cargo en los transbordos bus - metro (DTPM, 2013). En cualquiera de los casos anteriores se permite realizar tres validaciones sin volver a pagar tarifa completa en una ventana de dos horas siempre y cuando dos de aquellas validaciones no se hayan realizado en el mismo servicio o en metro. Los datos utilizados en este trabajo se recolectaron entre el 16 y el 22 de abril de 2012 y provienen de tres de las cuatro fuentes identificadas por Chu et al. (2011):

- Validaciones de subida realizadas con tarjeta bip! por parte de los usuarios (AFC).
- Pulsos GPS emitidos por los buses que componen el sistema (AVL).
- Paraderos y trazados de todos los recorridos del sistema, junto con una zonificación de aproximadamente 800 zonas de la ciudad denominada zonificación 777 (DTPM, 2013) (GIS).

Para poder obtener indicadores de calidad de servicio confiables a nivel de paradero con los datos enunciados anteriormente fue necesario realizar algunos preprocesos, en especial en la base de datos de validaciones. A continuación se detalla la información disponible en cada una de estas fuentes de datos

#### 3.1. Base de horas de pasada por paraderos

La tabla de posiciones GPS es una tabla donde se reportan todos los pulsos emitidos por los equipos GPS instalados en los buses que componen el sistema. Debido a que parte del pago a los operadores está dado por los buses-km ofertados y esto último se fiscaliza a través de los equipos GPS es que todos los buses del sistema poseen uno de estos aparatos, lo cual asegura una cobertura total. Los pulsos GPS requieren ciertos procesos para convertirse en información útil: en primer lugar se le asigna un servicio-sentido a la patente y por ende a la secuencia de pulsos GPS, luego se determina los instantes en los cuales el bus estuvo en maniobras de posicionamiento con el objetivo de determinar el horario de operación en ese servicio. Posteriormente, los pulsos son proyectados a la ruta del servicio-sentido correspondiente mediante un procedimiento descrito por Cortés et al. (2011), y finalmente se estima la hora de pasada por cada paradero del servicio. La información disponible en la tabla de horas de pasada por paradero es la siguiente:

- Servicio.
- Patente.
- Código del paradero.

- Correlativo del paradero dentro del recorrido que está sirviendo.
- Identificador de la expedición.
- Hora de pasada por el paradero.

Los resultados de esta tabla permiten estimar tiempos de viaje y calcular intervalos entre buses sucesivos del mismo servicio para cada paradero de su trazado, con lo cual se pueden obtener indicadores de regularidad.

#### 3.2. Base de datos de viajes

La segunda (y principal) fuente de información utilizada es aquella relacionada con el seguimiento de las tarjetas utilizadas por los usuarios. Dado que cada validación posee información precisa respecto del servicio utilizado y la hora de validación, es posible hacer un seguimiento confiable para cada una de ellas. Para la construcción de la tabla de viajes se requieren ejecutar dos procesos:

- Estimación de la etapa.
- Estimación del viaje.

Para estimar el origen - destino de cada etapa realizada por los usuarios, se debe estimar el paradero de subida (que puede ser una parada de bus o estación de metro) y el de bajada. Dado que la validación tiene información de la patente del bus o de la zona paga o de la estación de metro donde fue realizada, ésta es asignada al servicio correspondiente y posteriormente al paradero más cercano donde se puede abordar el servicio (cuando la validación se realiza arriba del bus), con lo cual queda estimado el paradero de subida. Por otro lado, para estimar el paradero de bajada se utiliza un enfoque de costo generalizado: se busca el paradero que minimiza el costo generalizado de llegar al paradero de subida de la siguiente validación; de manera gráfica este fenómeno se visualiza en la Figura 3.1 y se describe de forma más detallada en Munizaga y Palma (2012). Con el paradero de subida y bajada estimado, se procede a caracterizar de forma detallada la etapa, en la cual aspectos como el tiempo de viaje, distancia recorrida y otros son imputados. El resultado final de este proceso es una tabla de etapas (entendiendo una etapa como una validación) que entrega la información de todas las etapas de viaje realizadas por todas las tarjetas del sistema en la semana de estudio.

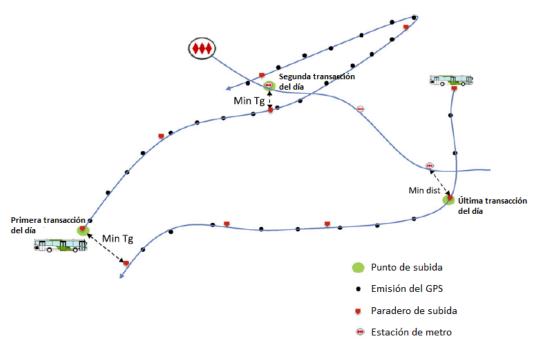


Figura 3.1: Estimación de paradero de bajada. Fuente: Adaptado de Munizaga y Palma (2012).

Luego de estimar las etapas, se procede a estimar los viajes de los usuarios. El supuesto utilizado para la estimación de viajes es que inicialmente se tiene solamente un viaje realizado en la semana, cuyas etapas son todas aquellas estimadas para la semana de estudio mediante la metodología explicada en el punto anterior.

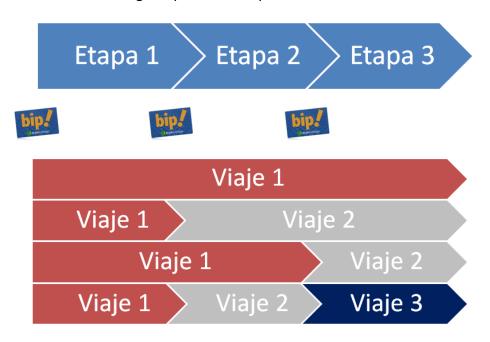


Figura 3.2: Estimación de los viajes.

Dado que en la práctica lo que probablemente ocurre es que hayan realizado varios viajes con la misma tarjeta es que se utilizan criterios para hacer la separación. En la Figura 3.2 se muestra un ejemplo de las posibles combinaciones de viajes que se pueden obtener a partir de 3 etapas estimadas en la semana de estudio. Munizaga y Palma (2012) proponen utilizar dos siguientes criterios para determinar si dos validaciones consecutivas pertenecen a viajes distintos:

- 1) Tiempo de transbordo mayor a 30 minutos, el cual es definido como la diferencia entre la hora de subida en una etapa dada y la hora de bajada estimada en la etapa anterior.
- 2) Validaciones consecutivas de una tarjeta en el mismo servicio incluso si es en el sentido contrario. También aplica en el caso de realizar dos validaciones consecutivas en estaciones de metro.

Los criterios anteriores son complementados por Devillaine et al. (2012), quienes incorporan dos criterios adicionales con el objetivo de detectar algunas conductas anómalas producto de las facilidades que el esquema tarifario provee para realizar más de un viaje en la ventana horaria definida para el sistema. A saber, los criterios adicionales propuestos son:

- 3) Criterio buses no abordados: Si entre la hora de llegada estimada al paradero y la hora de subida al siguiente bus pasaron más de tres buses por éste, entonces se asume que se realizó una actividad en el destino y por ende que allí terminó el viaje.
- 4) Razón distancia en ruta distancia euclidiana (DR/DE) mayor a  $\frac{1}{1.02}$  y menor a 2, donde DR es la suma de la distancia recorrida por los buses en todas las etapas del viaje y DE es la distancia euclidiana entre el paradero de subida y el paradero de bajada. Este criterio pretende filtrar viajes en los que la ruta seguida para realizar el viaje es muy intrincada con respecto a la forma más directa de realizar el viaje (que en este caso se supone una línea recta), lo que hace presumir que se realizó una actividad en alguna etapa intermedia.

A partir de la tabla de etapas y utilizando los criterios 1) a 3) entre los antes descritos (es decir, se relaja la utilización del criterio DR/DE por la fundada presunción de tener viajes donde la distancia en ruta fuera más del doble de la distancia euclidiana entre paraderos de origen y destino) se diseña la tabla de viajes, que posee la siguiente información:

- Paraderos de subida y bajada, tanto para el viaje completo como para todas las etapas del viaje.
- Secuencia de servicios utilizados por los usuarios, detallando el servicio-sentido en el caso de etapas realizadas en bus, y la estación de subida en el caso de metro.
- Hora de subida y de bajada al mismo nivel que la estimación de paraderos de subida y bajada.
- Tiempo de viaje del viaje completo, además del detalle de cada etapa (viaje arriba del bus, caminata y espera en el transbordo, si es que hubiere).

Es de particular importancia entender el procedimiento utilizado para medir el tiempo de viaje, puesto que es la principal fuente de entrada para los indicadores calculados y por lo tanto es totalmente necesario verificar que cada componente de este valor es confiable.

- El tiempo en vehículo se mide a partir de la hora estimada de pasada por los paraderos de subida y bajada en el caso de buses, y del tiempo estimado en los programas de operación en el caso de metro.
- El tiempo de transbordo se calcula como la diferencia entre la hora estimada de subida en una etapa y la hora de bajada en la etapa anterior. Esta se separa en tiempo de caminata, que se calcula a partir de la distancia euclidiana entre los

paraderos involucrados en el transbordo asumiendo una velocidad de caminata de 4 [Km/hr], y el *tiempo de espera*, el cual es calculado como la diferencia entre el tiempo de transbordo y el tiempo de caminata calculados previamente.

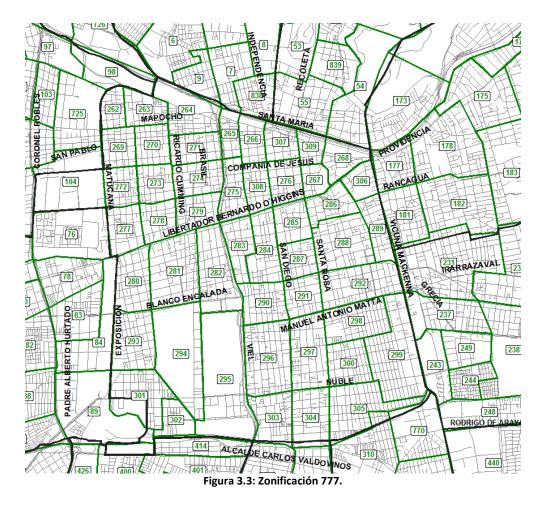
Cabe destacar que existen 3 entidades donde realizar validaciones: la primera es el bus, en el cual el usuario valida al momento de subirse a él. La segunda es el metro, donde el usuario luego de realizar la validación debe caminar hasta la plataforma y luego esperar por un tren. La tercera y última es la zona paga (ZP), en la cual el usuario luego de validar debe esperar dentro de ella por un bus. A partir de lo anterior se detectan tres diferencias fundamentales: la primera es que en metro y zona paga la validación se realiza fuera del bus, la segunda es que las etapas iniciadas en metro o zona paga implican una espera posterior a la validación que se estima de una manera distinta a las etapas de bus, y la última es que en las validaciones en metro existe una caminata extra al lugar de espera (al contrario de bus y zona paga que no contemplan esa caminata). A pesar de que la forma definida previamente para estimar los tiempos de viaje es conceptualmente correcta, genera resultados contratituitivos en algunos casos. Las causas más importantes son:

- Se asume que la velocidad de caminata es única para todos los usuarios, por lo cual si por algún motivo el usuario logra abordar el siguiente bus antes de la hora estimada de llegada al paradero la espera resulta ser negativa.
- Los tiempos de transbordo desde y hacia metro están incorrectamente caracterizados en general, esto se debe a que 1) el tiempo de viaje en metro no considera el tiempo consumido en transbordos internos y 2) se asume que la estación de metro es una entidad en el plano al igual que un paradero de bus, con lo cual cualquier caminata dentro de la estación para llegar al torniquete no es considerada.
- En la construcción de la tabla de viajes se asumió que el viaje arriba de un vagón de metro inicia al momento de validar, sin considerar el tiempo desde la validación en el torniquete hasta la llegada al andén ni la espera inicial por el tren. De la misma forma, si una etapa es realizada en zona paga asume que el viaje en el bus inicia al momento de validar, sin considerar la espera dentro de la misma.

Como consecuencia de lo anterior, en cualquier transbordo bus-metro el tiempo de caminata está subestimado, y el tiempo de espera no tiene relación alguna con el tiempo de espera real experimentado por los usuarios. Por otro lado, el tiempo de transbordo desde metro a bus está sobreestimado en todos los casos puesto que las caminatas internas en metro que actualmente no son consideradas son imputadas al tiempo de espera de la etapa hecha en bus. La magnitud de la sobreestimación está dada por el tiempo de caminata dentro de las estaciones de metro de subida y bajada, además del tiempo utilizado en transbordos internos.

#### 3.3. Información geográfica

De manera adicional a las posiciones GPS y a los viajes, se posee información geográfica utilizada habitualmente para efectos de planificación y diseño de los servicios, los cuales se dividen en 3 grupos de datos: el primero es la zonificación 777, la cual se crea a partir de la zonificación EOD para estudios de transporte. Un ejemplo de la zonificación se muestra en la Figura 3.3:



Como se puede ver en la Figura 3.3, la utilidad de esta zonificación radica en que tiene un grado de agregación mucho más manejable para efectos de planificación de transporte que el nivel de paradero (para la comuna de Santiago Centro – delimitada en negro – existen 48 zonas 777), manteniendo zonas homogéneas en su composición y siendo sensibles al acceso de transporte (es decir, son más pequeñas donde el acceso de transporte es mayor y viceversa); esta zonificación es utilizada para realizar agrupaciones de nivel medio de los resultados, para los cuales el nivel de paradero puede ser demasiado detallado y el de comuna extremadamente agregado. La segunda fuente de información geográfica corresponde al consolidado de paradas, el cual corresponde al listado de todos los paraderos del sistema; éste referencia geográficamente cada una de las paradas e indica los servicios que allí se detienen. Finalmente, la tercera fuente de información geográfica disponible son los trazados de servicios que operan en el sistema de transporte público. Tanto los paraderos como los trazados se encuentran en shapes (archivos de extensión .shp), dispuestos para el uso público por parte de DTPM (2013).

### 4. Correcciones a la tabla de viajes

El principal problema detectado en la base de viajes es que no posee el nivel de detalle necesario para obtener indicadores confiables de nivel de servicio. Se detectan dos causas por las cuales esto sucede: la primera es que el cálculo propuesto por Munizaga y Palma (2012) para el tiempo de viaje en vehículo, caminata y espera en algunos casos arroja resultados contraintuitivos, mientras que la segunda se debe a que la metodología de separación etapa — viaje propuesta por Munizaga y Palma (2012) y complementada por Devillaine et al. (2012) estima como viajes algunas secuencias de etapas que no son tal; es decir, hay secuencias de etapas que se reconocen como un solo viaje cuando en realidad el usuario realizó más de uno, o bien etapas que la metodología estima que se encuentran en viajes separados cuando en realidad corresponden al mismo viaje.

En el presente capítulo se abordarán los dos problemas antes planteados: por un lado se mejorará la estimación de los tiempos de viaje en vehículo, caminata y espera, y por el otro se desarrollarán criterios que permitan filtrar secuencias de etapas que representen, o bien experiencias irreales de viaje o bien más de un viaje, con el objetivo de eliminar viajes considerados como sospechosos, y que por ende no representen experiencias reales de servicio experimentadas por los usuarios. Esta labor debe ejecutarse con especial cuidado puesto que es fundamental distinguir viajes hechos en condiciones particularmente desfavorables dadas las características del sistema de aquellos viajes mal estimados. Mientras que los primeros son de especial interés para identificar los viajes realizados con el peor nivel de servicio con el objetivo de mitigarlos, los segundos llevarían a distorsionar los indicadores (que pueden ser bastante sensibles a las peores experiencias de viaje de los usuarios).

# 4.1. Corrección de variables de servicio en la tabla de viajes

La metodología desarrollada por Munizaga y Palma (2012) fue desarrollada originalmente para la estimación de las actividades en el destino del viaje, por lo mismo los esfuerzos fueron puestos mayormente en la correcta estimación de la bajada en desmedro de la correcta caracterización de los niveles de servicio para cada una de las etapas del viaje. La primera contribución de la presente tesis es proponer una metodología para corregir los tiempos de viaje, caminata y espera mediante la incorporación de información exógena y mejoras metodológicas, las cuales serán presentadas a continuación.

#### 4.1.1. Tiempos de caminata de acceso y egreso en estaciones de metro

La metodología de estimación de viajes asume que el tiempo de viaje en el vehículo comienza al momento de validar; ésto es correcto cuando la validación se realiza arriba del bus, sin embargo lo anterior no sucede cuando la etapa es realizada en zonas pagas o en

metro. Este problema fue abordado por Munizaga y Palma (2012) en el caso de las etapas iniciadas en zonas pagas (aunque como veremos más adelante, una nueva corrección será necesaria para afinar estos casos), pero no así en el caso de subidas en metro. En particular, en este último caso existen dos tiempos que se desprecian bajo los supuestos anteriores:

- Desde la validación en el torniquete hasta la llegada al andén (acceso).
- Desde la llegada al andén hasta abordar el tren (espera).

Este supuesto distorsiona de manera significativa la estimación de los tiempos previos a abordar el vagón de metro, tanto en la etapa de metro (que se ven subestimados) como en una siguiente etapa, si hubiera (que se sobreestima). Adicionalmente, si es que después de la etapa efectuada en metro existiera un transbordo hacia bus, también debería incorporarse el tiempo utilizado desde la bajada del tren hasta la llegada a la superficie (egreso) para que los tiempos de transbordo metro — bus queden correctamente caracterizados. Cabe destacar que lo anterior tiene un propósito adicional, el cual es poder establecer una comparación justa entre los tiempos de viaje de bus y metro, puesto que mediante la incorporación de las caminatas se logra realizar una medición de tiempo de viaje a nivel de superficie, aspecto a menudo despreciado cuando se evalúan los niveles de servicio en metro pero que es muy relevante para los usuarios.

Los tres tiempos descritos anteriormente se incorporan a la tabla de viajes. Para ello, se imputa el tiempo de acceso y de espera en cada estación (en distintos tramos horarios) en función de la frecuencia efectiva programada para ambos sentidos (es decir, se incorporan fenómenos tales como los bucles y operación expresa). A través de mediciones de voluntarios se pudo calcular los tiempos de caminata de acceso (desde el torniquete al andén) y egreso (desde el andén hasta la salida a la calle), mientras que los intervalos programados que permiten calcular el tiempo de espera se calcularon a partir del programa de operación de metro en la fecha de estudio. El detalle de los tiempos de acceso y egreso obtenidos por los medidores para cada una de las estaciones de metro se encuentran en el Anexo 1.

#### 4.1.2. Corrección de tiempos en tabla de viajes

Debido a los fenómenos descritos en la Sección 3.2, en los transbordos bus — bus la metodología usada actualmente para el cálculo de tiempos de espera arroja esperas negativas en algunos casos, por lo que se hace imperioso replantearse la forma en la cual se calculan. En la Figura 4.1 se muestra un ejemplo de cómo podría ocurrir lo anterior, donde los instantes  $t_1$  y  $t_2$  corresponden a las subidas al bus en la primera y segunda etapa, respectivamente (aunque es trivialmente extensible a cualquier par de etapas consecutivas). Dado que el tiempo de caminata en la segunda etapa  $tc_2$  se considera fijo, si por alguna razón el usuario ocupa menos tiempo que  $tc_2$  desde que se baja del primer bus hasta que aborda el segundo, la metodología actual concluye que el tiempo de espera en la segunda etapa sea negativo, lo cual carece de sentido porque el tiempo es por definición no negativo.

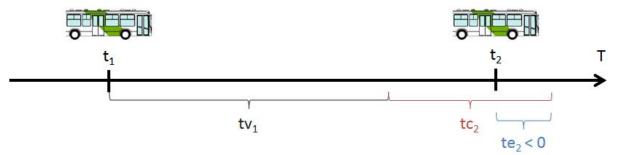


Figura 4.1: Viaje bus - bus sin corregir.

Para corregir esta anomalía, se sugiere corregir el tiempo de viaje de la primera etapa y de espera de la segunda etapa. Por un lado,  $tv_1$  debería ajustarse de forma que  $(tv_1+tc_2)$  sea igual a  $(t_2-t_1)$ . Con el ajuste anterior, el tiempo de espera resulta ser igual a 0, lo que es consistente con el hecho que el usuario abordó el bus apenas llegó. Los tiempos corregidos de viaje en bus, caminata y espera, respectivamente (denotados como  $tv_1^{\mathcal{C}}$ ,  $tc_2^{\mathcal{C}}$  y  $te_2^{\mathcal{C}}$ ) se muestran en la Figura 4.2.

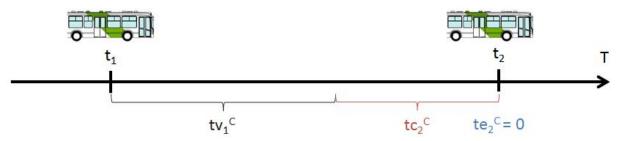


Figura 4.2: Viaje bus – bus corregido.

Adicionalmente, en la Sección 3.2 se mencionó que el detalle de los tiempos involucrados en el viaje (en el vehículo, de espera y caminata) no se encuentra correctamente especificado en cualquier viaje donde alguna de las etapas utilizadas haya sido metro, que corresponden a aproximadamente el 60% de los viajes para el corte temporal utilizado. Las razones por las cuales sucede esto se ilustran en el ejemplo de la Figura 4.3, donde se muestra la distribución de estos tiempos en un viaje bus – metro, en el cual se denotan como  $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$  los instantes de subida al bus en la primera etapa, validación en un torniquete de metro en la segunda etapa y subida al carro de metro respectivamente. A partir de lo observado, se pueden detectar dos errores en la estimación: el primero es que el tiempo de caminata sólo considera la componente "en superficie", despreciando la componente desde torniquete a plataforma, mientras que el segundo está dado por el supuesto de que el viaje en el carro de metro inicia en el momento de la validación, por lo que este valor no tiene relación alguna con lo que el usuario debe esperar.

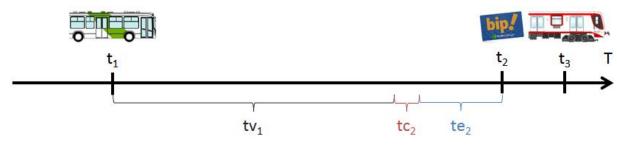


Figura 4.3: Viaje bus - metro sin corregir.

Para corregir los errores mencionados, se sugiere realizar dos correcciones. Para corregir el tiempo de caminata se debe agregar la componente desde la validación hasta la llegada a la plataforma, mientras que para corregir el tiempo de espera se imputa la mitad del intervalo programado. Los tiempos corregidos  $\operatorname{tv}_1^{\mathcal{C}}$ ,  $\operatorname{tc}_2^{\mathcal{C}}$  y  $\operatorname{te}_2^{\mathcal{C}}$  se muestran en la Figura 4.4.

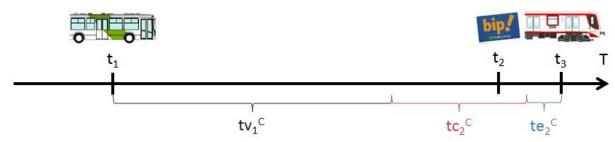


Figura 4.4: Viaje bus - metro corregido.

Las distorsiones antes presentadas son aún más evidentes en el caso de los transbordos metro — bus. En la Figura 4.5 se muestra la distribución de los tiempos de viaje, caminata y espera para estos casos, donde  $t_0$ ,  $t_1$  y  $t_2$  son los tiempos de validación en el torniquete, subida al carro de metro y subida al bus en la etapa siguiente, respectivamente. En este caso, la mayor distorsión está en el tiempo de viaje de la primera etapa, y viene dada por dos motivos: el primero es por el supuesto de que el viaje inicia al momento de validar y el segundo se debe a que en ese tiempo no están incorporados los transbordos internos. También hay una distorsión en el tiempo de caminata debido a que no está incorporado el tiempo de salida desde el andén a la calle, y las dos distorsiones anteriores (que tienden a subestimar dichos valores) producen una gran sobreestimación del tiempo de espera.

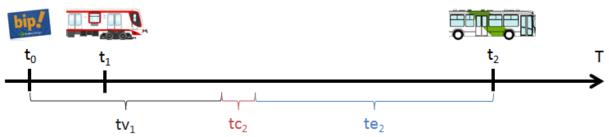


Figura 4.5: Viaje metro – bus sin corregir.

Las correcciones propuestas para este caso contemplan en primer lugar la incorporación del tiempo de caminata y de espera en la primera etapa, además de agregar el tiempo consumido en transbordos internos en el tiempo de viaje de la primera etapa y el tiempo de caminata desde el andén a la calle en la caminata de la segunda etapa. Todas las correcciones anteriores impactan indirectamente en la espera, que disminuye drásticamente. Los tiempos corregidos  $tc_1^C$ ,  $tc_1^C$ ,  $tc_1^C$ ,  $tc_2^C$  y  $tc_2^C$  se muestran en la Figura 4.6:

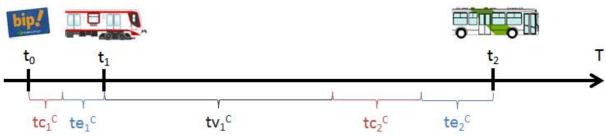


Figura 4.6: Viaje metro – bus corregido.

Inspirados en las observaciones realizar previamente, se propone una metodología para corregir los tiempos de viaje en vehículo, espera y caminata estimados por Munizaga y Palma (2012) y explicados en la Sección 3.2, de modo que cumplan con condiciones mínimas de coherencia, de manera de tener experiencias de viaje creíbles y con ello obtener indicadores de calidad de servicio razonables. Debido a la distinta naturaleza de los transbordos entre ellas, cada posible combinación de ellas (sólo se excluye el caso ZP – ZP pues no permite estimar correctamente la bajada; el detalle de la argumentación se encuentra en el Anexo 3) es corregida de una manera diferente. La corrección de tiempos de viaje se realizó bajo el supuesto de que los instantes creíbles y usados como referencia son aquellos donde el usuario sube al bus si es que se inicia la etapa en una zona paga, o bien el de las validaciones cuando la etapa se inicia en metro o en una parada sin zona paga.

El instante de referencia utilizado en zona paga es distinto al de bus y metro debido a que el comportamiento de los usuarios en las zonas pagas no siempre es el mismo: mientras que en algunas zonas pagas los usuarios validan y esperan el bus dentro de ella (comportamiento similar al de metro), otros usuarios hacen fila y validan sólo cuando se ubican en la porción de la fila que se encuentra dentro de la misma. Es por ello que se considera mejor referencia el instante estimado del paso del bus al cual se le imputa la subida al usuario.

Todas las acciones que intuitivamente ocurren entre dos de los instantes de referencia descritos anteriormente (esperas, caminatas o viaje arriba del vehículo, según sea el caso) deben durar exactamente el tiempo transcurrido entre ellas. El tiempo más susceptible a mantenerse fijo es la caminata, luego el tiempo de viaje (se considera menos susceptible que la caminata porque en algunos casos el bus abre sus puertas antes de la llegada al paradero) y finalmente la espera. La decisión de fijar el tiempo de caminata se basa en el hecho que no existe información complementaria que permita imputar una velocidad de caminata en función de género, edad o condiciones de movilidad.

Para efectuar las correcciones se asumirán como ciertos aquellos tiempos que actualmente están en la tabla de viajes, y dependiendo de la combinación de modos involucrados en el transbordo se realizará una corrección particular. Cuando un viaje tiene más de dos etapas, cada transbordo se corrige de forma secuencial desde el primer transbordo hasta el último intentando mantener fijo el tiempo de caminata, viaje y espera, respectivamente. Sea:

- $\mathbf{d}_i$ : Tiempo transcurrido entre el instante de la validación de la etapa i y el instante de la validación de la etapa i+1.
- ${\it acc}_i$ : Tiempo de caminata desde el torniquete hacia la plataforma en la etapa i del viaje, si es que ésta se realiza en metro.
- $\mathrm{sal}_i$ : Tiempo de caminata desde el descenso del tren de la última línea tomada por el usuario hasta la salida de la estación en la etapa i del viaje, si es que ésta se realiza en metro.
- ${\operatorname{esp}}_i$ : Tiempo de espera por el primer tren abordado en metro en la etapa i del viaje, si es que ésta se realiza en metro.
- ${
  m tc}_i^0$ : Tiempo estimado por Munizaga y Palma (2012) de caminata previo a empezar la etapa i de viaje.
- ${\sf te}_i^0$ : Tiempo estimado por Munizaga y Palma (2012) de espera previo a empezar la etapa i de viaje.

 $tv_i^0$ : Tiempo estimado por Munizaga y Palma (2012) de viaje en la etapa i de viaje.

tt<sub>i</sub>: Tiempo total consumido en transbordos internos en la etapa *i* , si es que realizada en metro. Este valor es fijo para cada par O-D de estaciones y considera tanto la caminata como la espera, la cual se asume igual a la mitad del intervalo programado de la línea de subida.

Los tiempos corregidos de caminata ( $tc_i^C$  y  $tc_{i+1}^C$ ), de espera ( $te_i^C$  y  $te_{i+1}^C$ ), y de viaje ( $tv_i^C$ ) se calculan de forma diferente según el tipo de transbordo. Los tiempos corregidos para un transbordo bus – bus (excluyendo los transbordos ZP – ZP) se calculan según las expresiones (4.1) a (4.3):

$$tc_{i+1}^{C} = tc_{i+1}^{0} (4.1)$$

$$tv_i^{C} = \min(d_i - tc_{i+1}^{C}, tv_i^{0})$$
(4.2)

$$te_{i+1}^{C} = d_i - tv_i^{C} - tc_{i+1}^{C}$$
(4.3)

Los tiempos corregidos para los transbordos bus – metro se calculan según las expresiones (4.4) a (4.7)

$$tc_{i+1}^{C} = tc_{i+1}^{0} + acc_{i+1}$$
(4.4)

$$tv_{i}^{C} = d_{i} - tc_{i+1}^{C}$$
(4.5)

$$te_{i+1}^{C} = esp_{i+1}$$
 (4.6)

$$tv_{i+1}^C = tv_{i+1}^0 + tt_{i+1} (4.7)$$

Finalmente, los tiempos corregidos para los transbordos metro – bus se calculan según las expresiones (4.8) a (4.11)

$$tc_{i+1}^{C} = tc_{i+1}^{0} + sal_{i} (4.8)$$

$$te_i^{C} = esp_i (4.9)$$

$$tv_i^C = \min(d_i - acc_i - te_i^C - tc_{i+1}^C, tv_i^O + tt_i)$$
(4.10)

$$te_{i+1}^{C} = d_i - tv_i^{C} - te_i^{C} - tc_{i+1}^{C}$$
(4.11)

Estas correcciones permiten tener tiempos de viaje más realistas y por ende dan pie para el cálculo certero de indicadores. Un ejemplo ilustrativo de lo anterior se muestra en la Figura 4.7, en la cual se muestran los tiempos de las distintas componentes del viaje antes y después de aplicar las correcciones antes mencionadas para los viajes de 2 etapas, separados por la combinación de modos utilizados: bus – bus (BB), bus – metro (BM) y metro – bus (MB). Al comparar el detalle de los tiempos de viaje, quedan en evidencia los cambios: mientras en los viajes BB los cambios son prácticamente inexistentes, en los viajes BM y MB tanto la duración total del viaje como la composición interna de los tiempos sufren modificaciones. La duración total de los viajes aumenta debido a la incorporación de tiempos de caminata de acceso y egreso, de la espera si es que la primera etapa fue metro, y de los transbordos internos en metro. Por otro lado, la composición interna de los tiempos de viaje

varía de forma sustancial en todos los viajes donde una etapa es realizada en metro, en particular los tiempos de transbordo se ven afectados fuertemente, pues la caminata aumenta significativamente (siendo aproximadamente el doble que en aquellos casos en los cuales los tiempos no están corregidos).

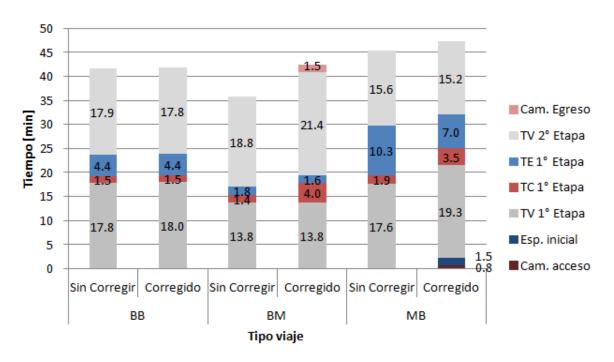


Figura 4.7: Indicadores de tiempo de viaje, para viajes de 2 etapas.

# 4.2. Filtrado de viajes anómalos

Corregir los niveles de servicio experimentados por los usuarios del sistema de transporte público no asegura por sí solo tener experiencias de viaje representativas de los usuarios. Es por ello que debe realizarse una segunda tarea para tener viajes correctamente caracterizados, la cual es filtrar viajes anómalos, que se generan por comportamientos atípicos de los usuarios que la metodología de estimación de viajes no logra estimar adecuadamente. El filtrado de los viajes se realiza verificando que éstos cumplan con condiciones mínimas de aceptabilidad. Mientras algunas condiciones permiten definir criterios estrictos de filtrado, otras requieren sensibilizar ciertos parámetros de la operación. Para cada una de estas condiciones a sensibilizar se realizaron muestreos de viajes, los cuales se analizaron uno a uno y con criterio experto se verificó la racionalidad de los mismos. Hay que acotar que la sensibilización se realiza de manera de eliminar la mayor cantidad de viajes anómalos posible, pero en estos casos cualquier umbral que se fije implica eliminar algunos viajes razonables y consentir algunos viajes anómalos. Se procura que ambos grupos sean de la menor magnitud posible, por lo que se seleccionará un umbral de manera que la tasa de viajes no razonables que se incorporan a los cálculos al relajar el umbral sea menor a la tasa de viajes razonables eliminados.

Los viajes considerados válidos (que finalmente se utilizan para medir indicadores) son posteriormente expandidos para el cálculo de indicadores según la expresión (4.12).

$$v^{\text{exp}} = v^{\text{s/exp}} \cdot \frac{v^{\text{s/exp}}}{v^{\text{filtro}}}$$
 (4.12)

Donde  $v^{\rm exp}$  son los viajes expandidos y considerados para efectos del cálculo de cualquier indicador,  $v^{\rm s/exp}$  son los viajes considerados sin expandir, es decir, aquellos originalmente estimados por Munizaga y Palma (2012) con la excepción mencionada en la Sección 3.2 y  $v^{\rm filtro}$  es el total de viajes filtrados. A continuación, se presentan los filtros desarrollados para mejorar la precisión de los viajes que serán usados para la medición de indicadores.

#### 4.2.1. Paradero de subida distinto a paradero de bajada

La metodología de estimación de bajada desarrollada por Munizaga y Palma (2012) no necesariamente estima un paradero distinto al de subida. Esta situación se presenta de forma habitual cuando existen dos viajes en el cual el primero es realizado en transporte público en una sola etapa y el segundo en algún modo no integrado, de forma que el segundo llega al mismo lugar donde se originó el primero (como ejemplo, salir de la casa al trabajo en transporte público y volver en taxi). Si en el siguiente viaje la primera transacción se origina en el mismo lugar del primer viaje, el algoritmo estima que la bajada del primer viaje realizado ocurre en el mismo lugar de la subida. Se verifica el cumplimiento de este criterio no sólo entre la subida y la bajada del viaje completo, sino que también para cada etapa por separado.

#### 4.2.2. Unidad de negocio repetida

Una validación de subida puede estar asignada a un servicio en particular, una estación de metro o bien a una unidad de negocios; esto último sucede en algunos casos en que no se logra identificar el servicio correspondiente. En el caso que exista sólo una etapa en que se encuentre asignada la unidad de negocios en vez del servicio (es decir, que aparezca "T4" en vez de "4011"), se asume que la información estimada por Munizaga y Palma (2012) para esa etapa (distancia recorrida, tiempo de viaje, etc.) es lo suficientemente confiable como para no distorsionar las características de aquel viaje. Sin embargo, en el caso donde existan dos etapas consecutivas asignadas a una unidad de negocio en vez de a un servicio en específico, se considera que hay suficientes distorsiones como para que los indicadores que se puedan obtener de allí carezcan de confiabilidad.

Cabe decir que una propuesta de solución para corregir el problema anterior podría ser el estimar el (conjunto de) servicios que el usuario abordó en la etapa problemática para imputarle alguno de ellos, para lo cual se requeriría como información de entrada el paradero de subida y bajada en esa etapa. Sin embargo, la complejidad de la tarea asociada y lo marginal de la cantidad de viajes afectados (como se verá en la Sección 4.2.10) hacen que se deseche realizar el esfuerzo que implica la mejora.

#### 4.2.3. Distancia mínima y máxima del viaje

Ya sea por las características de los usuarios, de la red de transporte y de la ciudad en sí, se considera que los viajes deben cubrir una distancia mínima y máxima para que sean considerados razonables de realizar en el sistema de transporte actual. En primer lugar, se ha establecido que la distancia mínima aceptable a recorrer en ruta debe ser de 250 [m]

para cada etapa por separado y 350 [m] para el viaje completo, lo cual se determina considerando que 1) 250 [m] es la distancia promedio entre paraderos y que 350 [m] es la distancia para avanzar dos paraderos muy juntos entre sí o bien uno muy separado del anterior y 2) se asume que un usuario no efectuará un viaje de una etapa para avanzar un paradero, mientras que sí existe la posibilidad de efectuar un avance de un paradero cuando es la primera o última etapa del viaje, puesto que esa etapa muy corta de todas formas es gratis para el usuario, y si esa etapa extra se realizara con una espera muy baja o alta velocidad puede llegar a ser más atractiva para el usuario que la caminata.

Por otro lado, se ha impuesto una distancia máxima de viaje de 50 [km], medida como distancia euclidiana, lo cual es suficiente para abarcar cualquier par de paraderos dentro de la ciudad. Al respecto, es importante acotar que se han revisado aquellos viajes que sobrepasan la cota y se ha concluido que todos los casos que cumplen esta condición se deben a un ingreso incorrecto de la coordenada del paradero de subida y/o bajada.

#### 4.2.4. Duración mínima del viaje

Al igual que en el caso anterior, se asume que los viajes deberían tener una duración mínima para ser considerados aceptables. Se ha impuesto una cota de 35 [seg], que es el tiempo empleado por un móvil a 60 [km/hr] para recorrer 350 [m], con lo cual se busca mantener una concordancia entre este criterio y el anterior. Aunque en un principio, este filtro y el anterior son redundantes, se decide aplicar los dos pues permite realizar una doble verificación de la validez de los viajes, aspecto que se considera importante puesto que la distancia del viaje y el tiempo transcurrido en el mismo se calculan de manera independiente, por lo que un viaje de duración aceptable puede ser extremadamente corto o largo, lo que conllevaría a una distorsión de los indicadores.

#### 4.2.5. Relación Distancia en Ruta / Distancia Euclidiana

Al observar los viajes de larga duración realizados por las personas, se puede percibir que muchos de ellos poseen trayectorias que se desvían mucho del destino al cual quieren llegar. En algunos casos una alta velocidad del servicio utilizado en alguna etapa, características geográficas o de las vías que impidan hacer el viaje de forma directa, o bien servicios con trazados intrincados pueden hacer que el usuario deba realizar tales desvíos para ejecutar su viaje. Sin embargo, existen también numerosos casos en los cuales el trazado utilizado para cubrir el par O-D del viaje es sospechosamente intrincado y da a entender que el usuario pudo haber realizado una actividad en algún lugar, como se muestra en la Figura 4.8.

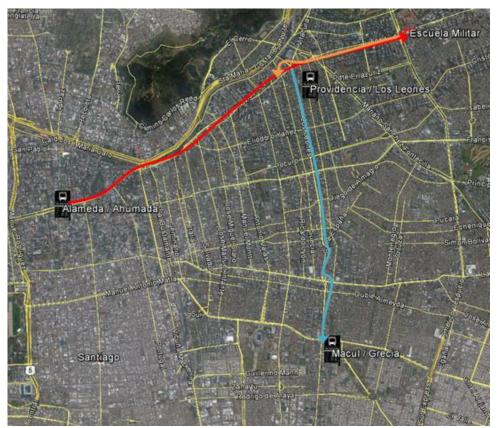


Figura 4.8: Viaje con ruta intrincada.

En la figura anterior se observa un viaje cuyo origen es la intersección de la Av. Libertador Bernardo O'Higgins (Alameda) con Ahumada, y cuyo destino es la esquina de Av. Macul con Av. Grecia, donde la metodología de estimación de viajes da como resultado un viaje de 3 etapas. La primera corresponde a una etapa en metro, cuyo origen es la estación Universidad de Chile y su destino es la estación Escuela Militar (en rojo), la segunda es una etapa en el servicio 401 desde Escuela Militar hasta Av. Providencia con Av. Los Leones (en Naranjo), y finalmente toma el servicio 104 hasta la esquina de Av. Macul con Av. Grecia. Al analizar la lógica del viaje, se puede concluir que el usuario pudo haberse bajado en la estación Los Leones (ubicado en la misma intersección de Providencia con los Leones) y tomar el servicio 104, sin tener que dar la vuelta adicional, con lo cual se deduce que en este caso se realizó una actividad intermedia (en Escuela Militar).

Para identificar estos casos, se realizó un análisis de viajes con trazados muy intrincados. Para ello, se analizó la razón entre la distancia euclidiana (DE) y la distancia en ruta (DR) para una muestra de viajes, donde DE es la distancia en línea recta entre los paraderos de origen y destino (en el ejemplo de la Figura 4.8, es de 5,1 kilómetros), mientras que DR corresponde a la longitud de la trayectoria efectivamente recorrida por el usuario en todas las etapas que realizó (la cual es de 13,9 kilómetros en el ejemplo). Cabe destacar que el análisis se segmentó en función del número de etapas del viaje y del tipo de servicios utilizados, puesto que en función de estas variables el comportamiento de los usuarios puede variar. También hay que acotar que estos criterios no aplican a viajes de una etapa, dado que aquel viaje no contempla transbordos, por lo que se considera razonable realizarlo sin importar lo intrincado de su trazado siempre y cuando cumpla el resto de los criterios.

Otro motivo por el cual se encuentran viajes con rutas muy intricadas es debido a problemas en la asignación en el sentido de un servicio. Este procedimiento lo debe realizar el

conductor de forma manual al iniciar su recorrido, por lo que existen numerosos casos en los cuales el conductor no lo hace. Sin importar la razón por lo que esto sucede, si un usuario se sube a un bus con el sentido incorrectamente asignado, la ruta imputada para esta etapa va en dirección contraria a la efectivamente realizada por el usuario, llega al terminal y luego toma el sentido correcto hasta llegar al paradero de bajada estimado. La situación antes planteada se ilustra en la Figura 4.9, donde la ruta efectivamente recorrida por el usuario se indica en verde y la estimada por el modelo está en rojo, y corresponde a una fuente de distorsión del tiempo de viaje, y por ende de los indicadores que se pretenden calcular.

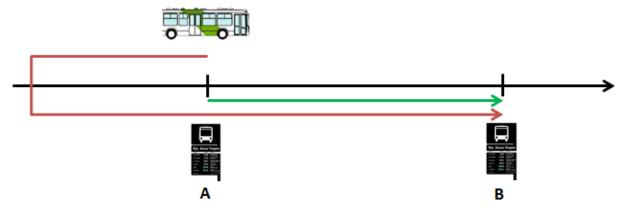


Figura 4.9: Bus con sentido incorrectamente asignado.

Con el objetivo de detectar estos casos es que se analizan aquellos viajes conde DR/DE es sospechosamente alto y se verifica si es que corresponden a alguno de los dos casos antes descritos, con el objetivo de encontrar una cota del valor DR/DE para filtrar viajes. Esta cota se calculará de forma independiente según el número de etapas del viaje, y para los viajes de 2 etapas, se estudia por separado las distintas combinaciones entre alimentador, troncal y metro, dado que cada uno de estos tipos de servicios tienen características distintas en cuanto a sus trazados. Con el propósito de identificar los viajes con un valor DR/DE muy alto en los viajes de 2 etapas que hacen combinación alimentador - alimentador, se analizó detalladamente una muestra de 50 viajes. La Figura 4.10 muestra la distancia y razón DR/DE de cada uno de ellos, donde los viajes considerados como no válidos son algunos de los que cumplen las dos condiciones descritas anteriormente.

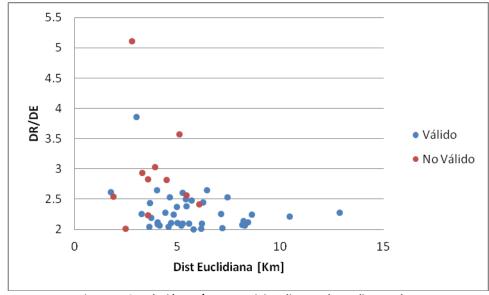


Figura 4.10: Relación DR/DE, para viajes alimentador – alimentador.

Se observa que los viajes considerados como válidos se encuentran en un rango de DR/DE menor a 2.7, por lo que este valor será la cota a utilizar para descartar viajes no válidos. Cabe destacar que hay un viaje considerado como válido que supera ampliamente esta cota, el cual al ser analizado en detalle se concluye que corresponde a un viaje originado en el sector residencial de la comuna de Quilicura y que tiene como destino el sector industrial de la misma comuna, los cuales se muestran en color azul y rojo en la Figura 4.11, respectivamente. Como se puede observar, hay una barrera que impide la conexión directa de estos dos sectores (en este caso, un tramo de la Ruta 5 Norte, el cual se destaca en amarillo) y por lo tanto los servicios de buses que sirven el par O-D (uno de ellos se indica en rojo) deben dar una larga vuelta que incrementa el valor DR/DE de cualquier viaje entre esos pares O – D. En base a lo comentado anteriormente, se decide crear una excepción para aceptar todos los viajes de 2 etapas entre estos pares O – D, sin importar su razón DR/DE.

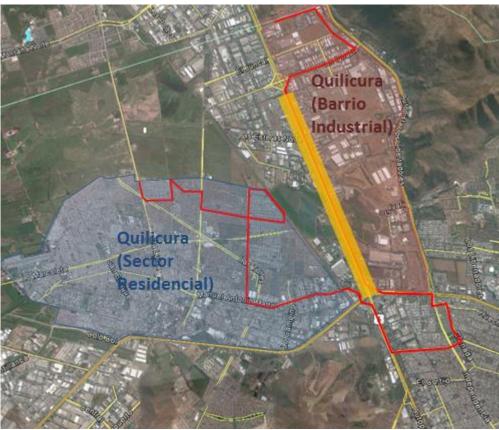


Figura 4.11: Viajes entre sector residencial e industrial de Quilicura.

Luego de examinados los viajes alimentador – alimentador, se procede a analizar los viajes alimentador – troncal. Para ello, se selecciona una muestra de 50 viajes y se analizan de la misma forma que el caso anterior. Los resultados del análisis se presentan en la Figura 4.12:

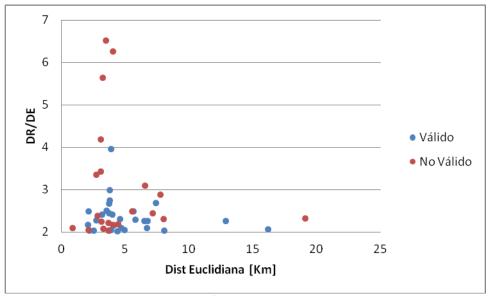


Figura 4.12: Relación DR/DE, para viajes alimentador - troncal.

A partir de los casos presentados en la figura anterior, se opta por definir una cota de DR/DE máxima para tener un viaje aceptable de 3.0. A priori se supondría que esta cota debiera ser menor a la de los viajes alimentador — alimentador (pues en general los trazados de los alimentadores son más intrincados que lo de los troncales), sin embargo la estructura de estos viajes consiste en un troncal muy directo y rápido con un alimentador muy intrincado, lo que hace suponer que la etapa en alimentador aumenta significativamente la razón DR/DE sin que ello implique un aumento importante del tiempo de viaje (pues la etapa en troncal se realizó muy rápidamente). En la Figura 4.13 se muestra el análisis realizado para los viajes alimentador — metro:

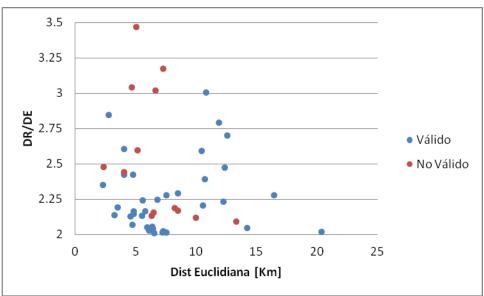


Figura 4.13: Relación DR/DE, para viajes alimentador-metro.

Aquí se aprecia que a partir de un valor de 3 en la razón DR/DE en adelante es donde se logra filtrar la mayor cantidad de viajes no razonables, lo cual está en concordancia con los resultados obtenidos para los viajes alimentador – troncal pues la estructura de los viajes es similar. En la Figura 4.14 se muestra el análisis realizado para los viajes de dos etapas con estructura troncal-metro:

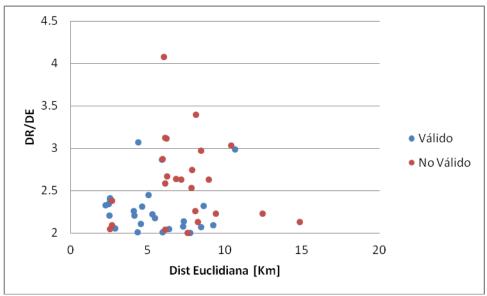


Figura 4.14: Relación DR/DE, para viajes troncal – metro.

Según lo observado en la figura anterior, se aprecia que la cota de DR/DE igual a 2.5 parece ser la adecuada para filtrar viajes anómalos; y comparada con las otras cotas propuestas parece tener sentido, puesto que nuevamente los trazados de los servicios troncales y de metro (a priori más directos que los de los servicios alimentadores por definición) generan viajes con trayectorias más directas. Finalmente, la Figura 4.15 muestra el análisis de los viajes de dos etapas para el caso troncal – troncal.

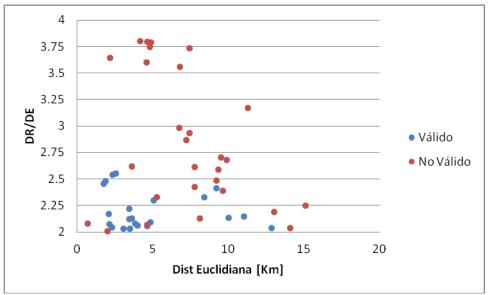


Figura 4.15: Relación DR/DE, para viajes troncal - troncal.

Al igual que en el caso troncal – metro, se puede concluir que una cota adecuada para el caso troncal – troncal sería de DR/DE igual a 2.5. Ya cubiertos todos aquellos casos de viajes de dos etapas, se procede a analizar los viajes de 3 etapas. A diferencia de los análisis realizados para viajes de 2 etapas, no se aprecia un comportamiento distinto entre las distintas combinaciones de tipos de servicios utilizados en cada una de las 3 etapas. Así, en la Figura 4.16 se presenta una muestra de 50 viajes de 3 etapas donde DR/DE es mayor a 2.

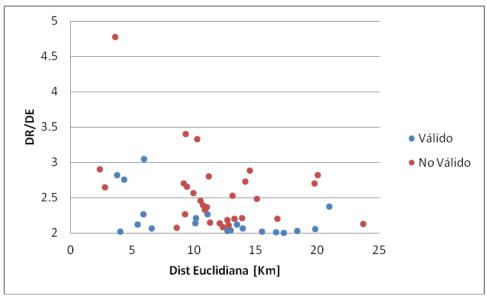


Figura 4.16: Relación DR/DE, para viajes de 3 etapas.

Al observar los resultados, se puede concluir que el comportamiento de los usuarios varía según la distancia euclidiana del viaje: cuando ésta es baja (el límite está en unos 7 [km]), el límite de DR/DE que permite filtrar datos anómalos es de 3, mientras que para distancias mayores la razón DR/DE límite es de 2.5.

En conclusión, el resumen de los criterios DR/DE utilizados para filtrar viajes anómalos se presentan en la Tabla 4.1:

Etapas	Tipo Viaje	Criterio(s) para descartar			
2 etapas	A - A	DR/DE > 2.7			
	A - T	DR/DE > 3.0			
	A - M	DR/DE > 3.0			
	T - M	DR/DE > 2.5			
	T - T	DR/DE > 2.5			
3 etapas		Si DE < 7 [km], DR/DE > 3			
		Si DE > 7 [km], DR/DE > 2.5			

Tabla 4.1: Criterios DR/DE para descartar viajes.

Al respecto, se debe acotar que los viajes de 4 etapas se excluyen de este análisis pues la cantidad de variables a analizar es mayor debido a la mayor complejidad del fenómeno (un viaje de 4 etapas implica un nuevo pago de la tarifa, por lo que deben existir motivaciones fuertes para decidir pagarla), por lo que estos casos se analizarán por separado en la Sección 4.2.7.

#### 4.2.6. Velocidad mínima y máxima

Si un viaje tiene velocidad extremadamente baja o alta es causa suficiente para sospechar de su validez. Los viajes con velocidad demasiado baja son una manera alternativa de detectar viajes de ida y vuelta con una actividad intermedia, mientras que los viajes con velocidad demasiado alta se deben principalmente a asignaciones incorrectas de las coordenadas de los paraderos de subida y/o bajada. Para los viajes con velocidad muy baja, se define como

regla de anomalía de un viaje que la velocidad en ruta (VR) en alguna etapa del viaje sea menor a 4 [km/hr], donde VR es el cuociente entre el largo de la trayectoria recorrida por el usuario y el tiempo de viaje, y se entiende como la rapidez de desplazamiento de los usuarios arriba del móvil. Luego, se define esa cota de manera que cualquier viaje que tenga una rapidez menor a la de una caminata relajada.

Por otro lado, para aquellos viajes con velocidad demasiado alta los análisis arrojaron como variables relevantes la velocidad euclidiana (VE) y velocidad en ruta (VR) y la distancia en ruta (DR), donde VR se define de igual forma a aquellos viajes con velocidad muy bajda, VE es el cuociente entre la distancia euclidiana entre el paradero de origen y el de destino y el tiempo de viaje (se interpreta como la velocidad promedio del viaje, independiente de la ruta empleada) y DR es la longitud de la trayectoria recorrida por el usuario en el viaje. A pesar de que en teoría utilizar VE y VR para filtrar viajes con velocidad muy alta es algo redundante, se decide hacerlo puesto que la distancia euclidiana y en ruta de una etapa o viaje se calculan de forma independiente: mientras la primera se calcula a partir de la posición de los paraderos de subida y bajada respectivamente, la segunda se calcula a partir del seguimiento de la posición del bus. Como en algunos casos se imputa incorrectamente la posición de los paraderos, utilizar ambas distancias sirve para eliminar inconsistencias que alteren los indicadores.

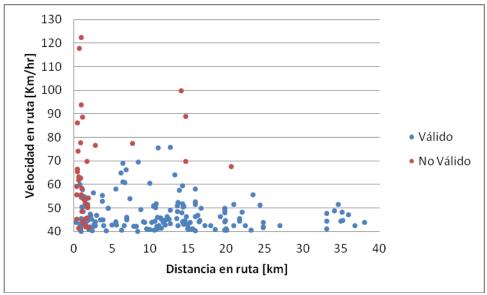


Figura 4.17: Filtro de velocidades altas.

En la Figura 4.17 se presenta una muestra de 200 viajes cuya velocidad en ruta es igual o superior a 40 [km/hr] en el viaje completo. Se observa que cuando la distancia recorrida por los usuarios es pequeña la cota de 60 [km/hr] parece ser razonable para detectar viajes anormalmente rápidos. A medida que aumenta la distancia de viaje la cota aumenta, y el límite de 70 [km/hr] parece ser adecuado para descartar la mayoría de los viajes anómalos, lo cual tiene sentido puesto que, para que algún servicio de bus pueda alcanzar esta velocidad (expresos y/o que van por autopistas) se debe recorrer una distancia significativa. En vista de los antecedentes presentados, se concluye que para que un viaje sea descartado por criterio de velocidad muy baja o alta, debe cumplir los criterios mostrados en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Criterios para filtrar velocidades bajas/altas.

Velocidad	Criterio(s) para descartar viajes				
Demasiado Baja	VR < 4 km/hr en alguna etapa				
Demasiado alta	VE > 70 km/hr				
	VE > 70 km/hr VR > 60 km/hr, DR < 5km VR > 70 km/hr, DR > 5km				
	VR > 70 km/hr, DR > 5km				

#### 4.2.7. Viajes de 4 etapas

Los viajes de cuatro etapas son excepcionales dentro del sistema puesto que implican un nuevo pago de la tarifa. A pesar de que en los análisis preliminares se consideraban estos viajes como anómalos, posteriormente se concluyó que existen pares Origen-Destino para los cuales los viajes de 3 etapas son demasiado desfavorables en comparación a una alternativa de 4 etapas, por ende en algunos casos podrían existir motivos para realizarlas. Considerando que el usuario debe observar ventajas evidentes a la hora de decidir realizar un viaje con dos pagos de tarifa, se estudia caso a caso una muestra de viajes de 4 etapas y se determinaron los criterios para detectar aquellos considerados anómalos. Se concluye que existen tres variables relevantes para caracterizar estos viajes:

- Combinación de modos utilizados: Debido a la estructura actual de la red, se necesitan a lo sumo 2 etapas para llegar a metro. Por lo tanto, se descartarán todos los viajes de 4 etapas cuya primera o última etapa sea metro.
- Hora de salida: Los viajes en punta mañana son más susceptibles de ser realizados en 4 etapas puesto que en general conllevan una hora de llegada estricta al destino, lo cual podría obligar a los usuarios a realizar una etapa más en pos de la velocidad. También existen más viajes de cuatro etapas que se originan en la noche, puesto que la red de transporte público se reduce y por ende algunos pares Origen-Destino requieren de más transbordos para ser cubiertos.
- Distancia euclidiana: Dado que la malla de trazados del sistema de transporte es suficientemente densa (incluso en horario nocturno), los usuarios no deberían realizar 4 etapas para cubrir distancias muy pequeñas.
- Razón Distancia en Ruta Distancia Euclidiana (DR/DE): Los usuarios podrían preferir realizar una etapa que conlleve pago extra si es que la ruta que los une es más directa (y presumiblemente más rápida) que en el caso de no pagarla. Este efecto en principio podría ser recogido considerando la velocidad del viaje, pero se prefiere esta variable puesto que la velocidad es variable a lo largo del día, mientras la razón DR/DE no.

Para realizar el análisis, se recoge una muestra de 200 viajes decidiendo la razonabilidad de la estrategia utilizada. Estos viajes se clasifican en 3 tramos horarios, según hora de salida: entre las 6:00 y 7:59 hrs. (viajes presumiblemente con hora de llegada fija al destino, que los hacen más susceptibles de realizarse en 4 etapas), entre las 8:00 y 21:59 hrs. (viajes donde presumiblemente la hora de llegada al destino no es tan estricta), y entre 22:00 y las 5:59 hrs. (horario aproximado en el cual la red de metro deja de entregar conexión completa dentro de su red o derechamente deja de estar disponible y además se deja de proveer servicios más rápidos y/o que ahorran transbordos, tales como servicios expresos).

Al contrario de lo mencionado al principio del presente Capítulo, para filtrar viajes de 4 etapas debe ser evidente que existen valores límite para efectuar los filtros, y en aquellos casos donde no se encuentre tal valor todos los viajes serán utilizados para efecto de calcular indicadores, a pesar de que en la muestra pueda haber una mayor proporción de viajes declarados como no válidos. La razón por la cual se toma esta decisión es que los viajes de 4 etapas son tan escasos que se perdería valiosa información si es que éstos son eliminados. En la Figura 4.18 se presenta el análisis realizado para los viajes iniciados entre 6:00 y 7:59 hrs.

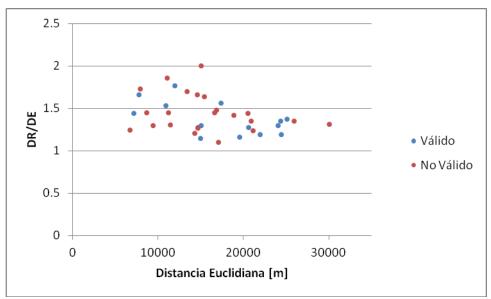


Figura 4.18: Viajes de 4 etapas, con hora de inicio entre las 6:00 y 7:59 hrs.

En vista de lo presentado en la figura anterior, no se ve posible descartar viajes en este tramo horario bajo alguno de los criterios antes descritos. En la Figura 4.19 se muestra el análisis hecho para los viajes con hora de salida entre 8:00 y 21:59 hrs:

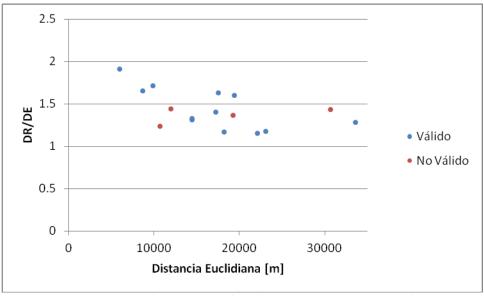


Figura 4.19: Viajes de 4 etapas, con hora de inicio entre las 8:00 y 21:59 hrs.

En la figura anterior se distinguen un par de situaciones factibles de filtrar: en primer lugar pareciera haber una distancia mínima para el cual ningún viaje de 4 etapas es admisible (que está alrededor de los 7 [km]), y además cuando la relación DR/DE se encuentra por encima

de 1.5 empiezan a encontrarse casos de viajes no válidos en mucha mayor proporción. Finalmente, en la Figura 4.20 se muestra el análisis para aquellos viajes con hora de salida entre las 22:00 y 5:59 hrs.

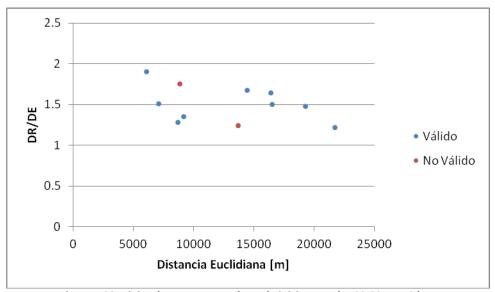


Figura 4.20: Viajes de 4 etapas, con hora de inicio entre las 22:00 y 5:59 hrs.

Al igual que en el primer caso analizado, bajo las variables examinadas no parece haber una forma clara de discernir entre viajes válidos y no válidos. En vista del análisis realizado, se concluye que los criterios utilizados para descartar viajes de 4 etapas serán los siguientes:

- Primera o última etapa realizada en metro.
- Hora de subida entre 8:00 y 21:59 hrs.
- DE < 7 [km] ó DR/DE > 1,5

#### 4.2.8. Etapa redundante

Otra fuente no trivial de viajes anómalos es aquella en que el usuario realiza una o más etapas de lo razonable en su viaje. Estos viajes denotan una actividad intermedia, y dada la complejidad del problema se requiere de varios criterios para filtrarlos. El primer criterio desarrollado tiene que ver con el hecho de que un usuario utiliza servicios que circulan por las mismas vías, el cual se ilustra en la Figura 4.21 y es una muestra inequívoca de que se realizó una actividad entre las etapas involucradas.

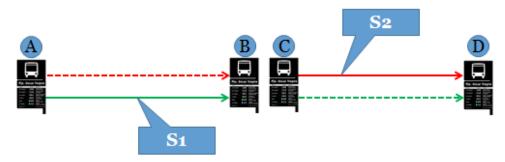


Figura 4.21: Etapa redundante.

En la Figura 4.21 se muestra un caso de dos servicios de bus ( $S_1$  en verde y  $S_2$  en rojo) y un viaje que se inicia en el paradero A, transborda en B-C y termina en el paradero D. Dado

que el usuario pudo haber llegado a D sin haber realizado transbordo alguno, el viaje se cataloga como anómalo. Esto se caracteriza a través de la condición (4.13):

$$(S_1, D)$$
 existe  $ó(S_2, A)$  existe (4.13)

Un caso donde podría no aplicar este criterio es el de los servicios expresos puesto que comparten trazados con otros servicios pero se detienen en un subconjunto de paradas de éstos; se concluye a partir de los patrones de viaje de los usuarios que tomar un bus no expreso, bajarse en un punto intermedio y luego tomar un servicio expreso no es una conducta usual en las circunstancias actuales. Otro caso donde podría no aplicar es en aquellos sectores donde los trazados de metro y de buses coincidan; al contrario del caso anterior aquí sí se permite la posibilidad de que un usuario utilice bus y después metro sin filtrar el viaje, puesto que existen casos donde la etapa en bus sirve para acceder a una línea que ofrece menores tiempos de viaje con respecto a la línea más cercana para el usuario en su origen. Un ejemplo de lo anterior es el viaje desde la estación Plaza de Maipú a Escuela Militar; a pesar de poder realizar el viaje de forma directa utilizando la línea 5 y luego la línea 1, es posible realizar el viaje de manera más rápida tomando bus y posteriormente línea 1.

#### 4.2.9. Ciclo en etapa intermedia

Cuando la metodología estima que un viaje inicia y termina en un lugar cercano, los criterios de DR/DE y velocidad son efectivos en detectarlos, sin embargo en aquellos viajes donde el retorno se genera en una etapa intermedia el error es de difícil detección. Un diagrama de la situación anterior se muestra en la Figura 4.22.

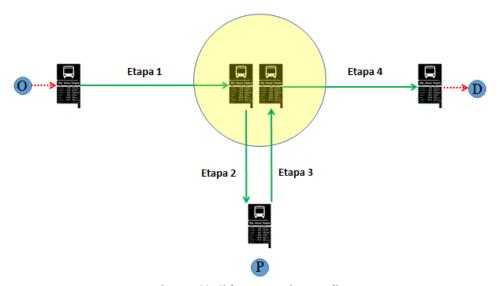


Figura 4.22: Ciclo en etapa intermedia

En la Figura 4.22 se ilustra un viaje de cuatro etapas entre O y D estimado por la metodología de Munizaga y Palma (2012), pero al analizar la secuencia de etapas se observa que el viaje entre O y D pudo haberse realizado en sólo dos etapas. Entre las etapas 2 y 3 el usuario toma un desvío innecesario, a menos que sea para realizar una actividad en P. Para detectar estos casos se analizan situaciones en que la bajada de una etapa se encuentra suficientemente cerca de la subida una etapa posterior del mismo viaje, es decir se observa un ciclo en la secuencia de etapas. Dado que el cálculo y posterior comparación de la distancia entre todos los pares paraderos de todos los viajes del sistema es un problema de alta complejidad

computacional, es que se busca una manera de simplificar la elección, es por ello que se escoge como nivel de agregación para este análisis la zonificación 777 dado que el tamaño de las zonas es sensible al acceso de transporte (son más pequeñas donde el acceso al transporte es mayor y viceversa), y hace razonable pensar que para moverse entre ubicaciones pertenecientes a la misma zona no es necesario realizar transbordos. Luego, el criterio creado para filtrar estos casos es el descrito en (4.14).

$$Zona777_{Subida}^{i} = Zona777_{Baiada}^{j}$$
 (4.14)

Donde i y j son etapas de viaje tales que j > i.

#### 4.2.10. Resumen de viajes filtrados

La Tabla 4.3 muestra un resumen de la cantidad de viajes filtrados por los criterios descritos en las Secciones 4.2.1 a 4.2.9, expandidos por la expresión (4.12).

**Viajes** [pax/día] Porcentaje Viajes sin filtrar 3.923.867 100,00% Paradero subida = Paradero bajada 4,71% 184.874 Unidad de negocio repetida 1.158 0,03% 4,87% Distancia mínima y máxima 190.903 Duración mínima 52.143 1,33% Relación DR/DE 6.706 0,17% **Filtros** Velocidad demasiado baja 136.402 3,48% 0,71% Velocidad demasiado alta 27.953 Viajes de 4 etapas 2.375 0,06% 0,70% Etapa redundante 27.453 0,21% Ciclo en etapa intermedia 8.069 **Total viajes anómalos** 272.969 6,96% 93,04% Viajes razonables 3.650.898

Tabla 4.3: Viajes filtrados

Respecto de los resultados de la Tabla 4.3 cabe acotar que, en primer lugar, debe considerarse que un viaje es susceptible de ser eliminado por varios de los filtros antes mencionados, razón por la cual el total de los viajes filtrados es menor a la suma de cada filtro por separado. En segundo lugar se puede apreciar que, si bien los viajes filtrados no son de una magnitud despreciable, tampoco lo son de una magnitud tal que comprometa la calidad de los resultados a obtener. También se puede observar que existen filtros más importantes que otros a la hora de descartar viajes: mientras criterios como el unidad de negocio repetida o el de relación DR/DE eliminan muy pocos viajes, otros como el que verifica paradero de subida distinto al de bajada, o el que filtra por distancia y tiempo mínimo de viajes (que están correlacionados entre sí) ayudan a descartar una gran cantidad de ellos.

# 5. Definición y cálculo de indicadores de calidad de servicio

Luego de filtrar la base de datos, se procede a proponer, calcular y presentar indicadores de calidad de servicio relevantes para medir la experiencia de los usuarios de transporte público. Estos indicadores se definen según su grado de relación con la experiencia de los usuarios y la factibilidad de ser calculados a partir los datos disponibles en el presente y el futuro, de modo que puedan ser útiles para monitorear el sistema y proponer líneas de acción. Los indicadores escogidos para el análisis son:

- Tiempo de viaje
- Número de etapas por viaje
- Distancia euclidiana de viaje
- Velocidad de viaje de los usuarios
- Razón distancia en ruta distancia euclidiana (DR/DE)
- Velocidad bus v/s auto
- Transbordos críticos

Estos indicadores pueden ser calculados con distintos niveles de agregación; es por ello que en las secciones siguientes se procederá a mostrar el alcance que algunos de ellos tienen con el nivel de agregación que se considera más adecuado para que adquieran relevancia. Cabe destacar que a partir de los datos disponibles es posible construir un gran número de indicadores, y aquellos que se mostrarán son una selección que pretende ser particularmente interesante, de modo de ilustrar el potencial de esta información.

#### 5.1. Indicadores a nivel de sistema

En la Figura 5.1 se muestra la evolución del valor promedio del tiempo de viaje (sin considerar caminatas ni espera inicial), número de etapas promedio por viaje, distancia euclidiana, velocidad de viaje de los usuarios y DR/DE, por periodos de media hora según hora de inicio del viaje. Según lo observado, en la madrugada y la punta mañana se aprecian condiciones de viaje que son las que más difieren de las del resto del día. Se aprecia que los viajes que se inician entre las 5:00 y las 5:30 hrs. son los más distantes, de mayor duración y con más etapas, los que típicamente son realizados por usuarios de zonas periféricas de la ciudad que se dirigen a trabajos en el sector oriente de la capital. Por otro lado, el mayor valor para la relación DR/DE se encuentra para los viajes iniciados entre las 5:30 y las 6:00 hrs., y los viajes donde los usuarios experimentan una menor velocidad son aquellos que comienzan entre las 7:30 y 8:00 hrs., lo que tiene directa relación con el aumento de la congestión y la consiguiente disminución de las velocidades en la superficie.

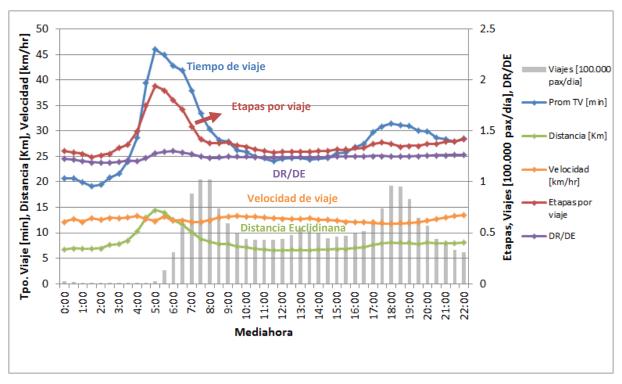


Figura 5.1: Indicadores de calidad de servicio, según mediahora de inicio del viaje.

Para el resto del día, los atributos antes enunciados de los viajes adquieren un valor relativamente constante, excepto para el período punta tarde en el cual las condiciones de viaje se vuelven a alterar. En este período, el tiempo de viaje, las etapas por viaje y la distancia euclidiana de viaje vuelven a subir (aunque en menor magnitud que en la mañana), y la velocidad de viaje disminuye, alcanzando su valor mínimo del día a las 18:00 hrs. Cabe destacar que para este análisis se utilizan sólo aquellos viajes que inician antes de las 22:30 hrs., lo cual se debe a que en el corte temporal de datos utilizado la metodología de estimación de viajes asume que transacciones consecutivas en días distintos corresponden a dos viajes diferentes, esto trae como consecuencia que cualquier viaje que tenga una etapa antes de la medianoche y otra después será "cortado" y contabilizado como dos viajes.

En la Figura 5.2 se muestra el tiempo promedio y máximo de viaje, por media hora de inicio del viaje. Al comparar este resultado con el obtenido por Beltrán et al. (2013) mostrado en la Figura 2.3, se observa que si bien el tiempo promedio de viaje es similar en ambos análisis, los máximos difieren. En primer lugar, se observa que al aplicar los filtros de viajes anómalos el tiempo máximo de viaje presenta saltos menos bruscos que los obtenidos por Beltrán et al. (2013), además de presentar una diferencia de comportamiento entre los horarios punta y los fuera de punta. Esto sumado al hecho de que ya no se observan viajes de más de 3 horas y media, se concluye que al menos en este aspecto los filtros de viajes anómalos representan un avance en la caracterización de los viajes con respecto a lo calculado por Beltrán et al. (2013).

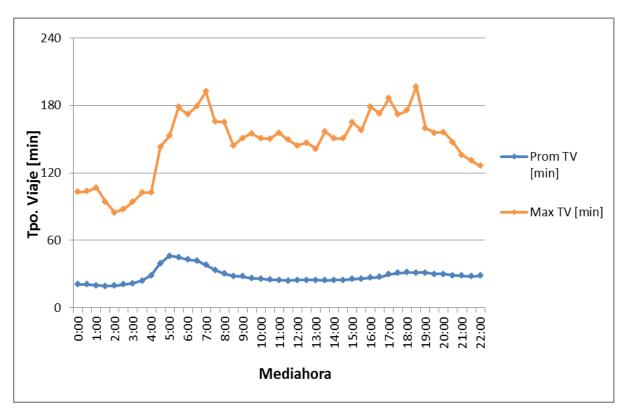


Figura 5.2: Tiempo promedio y máximo de viaje, según mediahora de inicio del viaje.

#### 5.2. Indicadores a nivel de comuna

La agregación a nivel de comuna es un nivel adecuado para calcular algunos indicadores relevantes. Para aquellos viajes entre cada par de comunas con hora de llegada entre las 8 y 9 hrs. se ha realizado el cruce entre la velocidad (en ruta) experimentada por los usuarios y la relación DR/DE, resultados que se muestran en la Figura 5.3 donde cada punto representa un par O-D de comunas y el área de cada punto es proporcional a la cantidad de viajes que se realizan entre ellas. De manera adicional se han destacado cuatro casos particularmente interesantes:

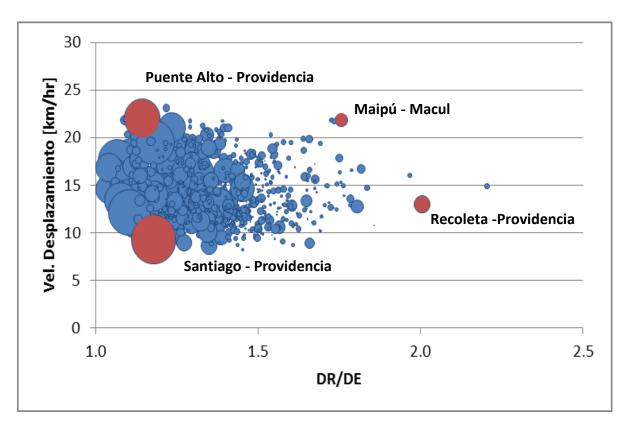


Figura 5.3: Velocidad de desplazamiento v/s relación DR/DE, entre pares de comunas.

El objetivo de este indicador es servir de ayuda a la búsqueda de estrategias que permitan (si es posible) mejorar el tiempo de viaje entre pares de comunas. En aquellos pares O-D de comunas ubicados en la esquina superior izquierda (que tienen alta velocidad y una relación DR/DE baja, como Puente Alto - Providencia) las condiciones son satisfactorias en términos de velocidad y conectividad. Los tiempos de viaje de los pares O-D de la esquina superior derecha (alta velocidad y alta relación DR/DE, como Maipú - Macul) eventualmente podrían mejorar con mayor conectividad, ya sea en infraestructura o mediante la creación de servicios más directos. Aquellos pares O-D de comunas en la esquina inferior izquierda (baja velocidad, baja relación DR/DE, como Santiago - Providencia) requieren medidas que apunten al aumento de velocidad (como medidas de prioridad para buses) para mejorar la calidad de servicio. Finalmente los pares de la esquina inferior derecha (baja velocidad, alta relación DR/DE, como Recoleta - Providencia) están en una situación que es altamente desagradable para los usuarios y requieren tanto medidas de prioridad como de conectividad para mejorar su calidad de servicio.

#### 5.3. Indicadores a nivel de zona 777

En la Figura 5.4 se muestra el número promedio de etapas por viaje generadas en cada una de las zonas 777 de origen (sin contar los transbordos en metro), para todas aquellas zonas de origen que tienen más de 20 viajes semanales hacia las zonas 267, 276, 285 y 286 (que corresponden al centro de Santiago y contienen las estaciones de metro Universidad de Chile, Plaza de Armas y Santa Lucía) con bajada entre las 8 y las 9 de la mañana. En la Figura se destacan las líneas de metro (en rojo) y los recorridos de buses que pasan por las zonas de destino (en línea negra punteada).

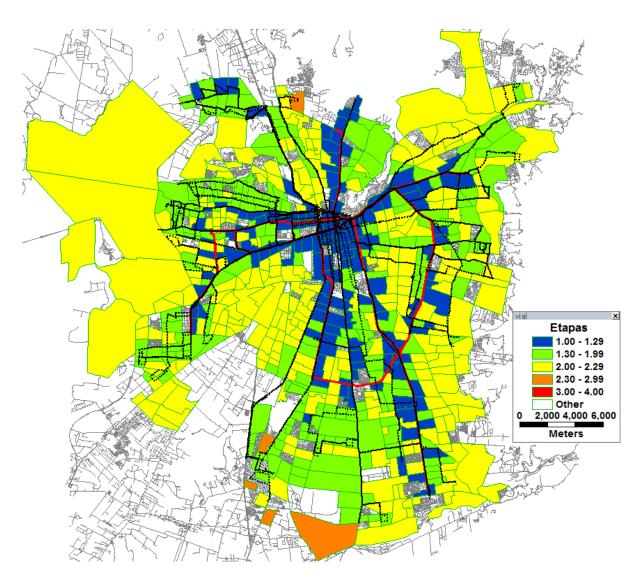


Figura 5.4: Número de etapas para llegar a la zona centro de Santiago, por zona 777 de origen, en período Punta Mañana.

Según lo observado en la Figura anterior, claramente hay una influencia de la red de metro en el número de etapas del viaje. Esto está ligeramente distorsionado por la definición utilizada para una etapa (validación), por lo que los transbordos dentro de la red de metro no son considerados como tales, sin perjuicio que muchos de estos viajes efectivamente no requieren de transbordos para llegar al destino. Al observar la Figura anterior también queda en evidencia que una proporción importante de los usuarios que inician su viaje en bus posteriormente realizan transbordos con otros buses o con metro incluso cuando poseen opciones sin transbordos para llegar; se presume que los usuarios tienen este comportamiento por el ahorro en tiempo que ello implica, pues la mayoría de estos recorridos deben enfrentar una gran congestión para llegar al centro de la ciudad.

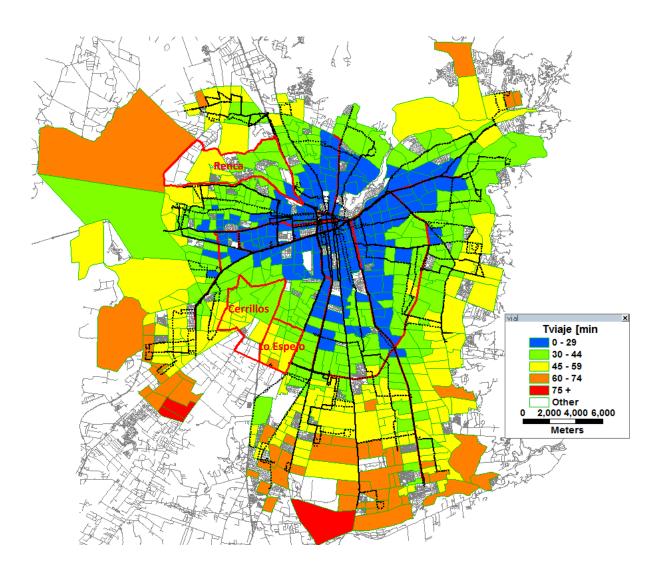


Figura 5.5: Tiempo de viaje (sin caminatas ni espera inicial) hacia la zona centro de Santiago, por zona de origen, en período Punta Mañana.

Otro aspecto tanto o más importante del viaje es el tiempo empleado para llegar a un destino específico, por lo que en la Figura 5.5 se muestra el tiempo de viaje promedio de los viajes que llegan a las mismas zonas y en el mismo horario de los viajes de la Figura 5.4. Tanto en la Figura 5.4 como en la Figura 5.5 se observa que en la zona de influencia de la red de metro, el tiempo de viaje y las etapas realizadas por parte de los usuarios son menores. Además, hay zonas donde consistentemente se observan pobres indicadores: usuarios de sectores como Lo Espejo, Renca o Cerrillos (destacados en la Figura 5.5) realizan en general viajes más demorosos y con más etapas que usuarios de otras zonas ubicadas a distancias similares del centro de la ciudad.

# 5.4. Indicadores a nivel de eje

Como se mencionó en la Sección 2.1.6, una medida relevante para evaluar la calidad de servicio del sistema de transporte es la relación entre la velocidad de los buses y la de los vehículos privados. Para determinar la velocidad de los autos, se ha utilizado información facilitada por la Unidad Operativa de Control de Tránsito (UOCT) sobre tiempos de viaje en arcos. Esta información proviene de mediciones realizadas a través del método del vehículo flotante (un vehículo que hace el viaje por el mismo eje y reporta el tiempo utilizado en cruzarlo). Para efectos de nuestro análisis se tomaron nueve tramos fijos, algunos de ellos en

punta mañana (7:30 – 9:00) y otros en punta tarde (18:00 – 20:00). La velocidad del transporte público se calcula a partir de las señales GPS de los buses cuyos servicios circulan por esos ejes. De manera adicional se indica la prioridad que tienen los buses en los tramos de vías estudiados: los buses pueden circular en tráfico mixto, pistas sólo bus, vías exclusivas, corredores de buses o combinaciones de los anteriores.

Tabla 5.1: Velocidad de auto v/s bus, en ejes UOCT.

					Vel. Autos	Vel. Buses	Dif.
Eje	Desde	Hasta	Prioridad	Periodo	[Km/hr]	[Km/hr]	Bus-Auto
							[Km/hr]
Alameda	Las Rejas¹	Exposición	Pista sólo bus	PM	16,7	16,5	-0,2
Alameda	Las Rejas¹	Exposición	Pista sólo bus	PT	19,6	19,1	-0,5
Providencia/Alameda	Salvador	Santa Rosa	Pista sólo bus	PM	15,1	20,8	5,7
Alameda/Providencia	Santa Rosa	Salvador	Pista sólo bus	PT	19,6	16,1	-3,5
Bilbao	Tobalaba²	P. de Valdivia	Pista sólo bus	PM	19,9	16,7	-3,2
Colón/E. Yañez	A. Vespucio	Los Leones	Tráfico mixto	PM	14,4	10,7	-3,6
Colón/E. Yañez	A. Vespucio	Tobalaba	Tráfico mixto	PM	14,2	10,3	-3,9
Irarrázaval	Bremen	A. Varas	Vía exclusiva	PM	18,7	16,2	-2,6
Larraín/Irarrázaval	Tobalaba	Coventry	Vía exclusiva	PM	21,7	14,3	-7,4
V. Mackenna	R. Magallanes <sup>3</sup>	Departamental	Corredor / Tráfico mixto	PM	16,4	17,2	0,8

Fuente: Velocidad de autos UOCT, velocidad de buses elaboración propia.

La Tabla 5.1 muestra los resultados de la comparación entre la velocidad en auto y en bus. Se puede ver que las condiciones que enfrentan los buses para su circulación tienen un efecto importante en su velocidad: en aquellos ejes donde la segregación es fuerte (como en Alameda o Av. Vicuña Mackenna) la velocidad alcanzada por los buses es similar o incluso superior a la que experimentan los vehículos particulares, mientras que en aquellos ejes donde la segregación es existente pero débil (como Bilbao) o es derechamente inexistente (como en Av. Larraín o Av. Colón) la velocidad es claramente favorable a los autos.

Cabe notar que lo anterior concuerda con lo calculado por Schneider (2013), que estima un modelo econométrico de velocidad para el eje Santa Rosa concluyendo que la existencia de corredores exclusivos tiene un alto impacto en la velocidad de los buses que circulan en ese eje, no así con las vías exclusivas ni las pistas sólo bus debido a la invasión por parte de los vehículos particulares, con lo que se desprende que las vías exclusivas y pistas sólo bus tienen un efecto en la velocidad de los buses sólo si son respetadas, lo que requiere una fuerte fiscalización. Esto es concordante con todos los resultados obtenidos, pues en todos los ejes excepto Alameda/ Providencia el efecto de las pistas sólo bus en la velocidad es mínimo. Alameda /providencia es la excepción por la cantidad de pistas dedicadas para los buses (entre 2 y 3 dependiendo del tramo) y la imposibilidad de viraje a la derecha hacia las calles transversales en casi toda su extensión, lo que en la práctica hace que los vehículos particulares tengan pocos incentivos para invadir la pista de los buses, lo que genera un respeto a la medida sin necesidad de fiscalizar.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Las Rejas representa a la intersección relevante más cercana a la calle Las Catalpas.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Tobalaba representa a la intersección relevante más cercana a la calle Las Luciérnagas.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Rojas Magallanes representa a la intersección relevante más cercana a la calle Los Pioneros.

### 5.5. Indicadores a nivel de paradero

Dado que la bajada y la subida están estimadas a nivel de paradero, lo ideal es que los niveles de servicio sean confiables incluso a este nivel de detalle. A modo de validar los resultados obtenidos para los tiempos de viaje se realiza una comparación con el termómetro de tiempo de viaje (DICTUC, 2011), el cual es un conjunto de mediciones realizadas en 27 pares Origen — Destino a nivel de esquina. Entre cada par O-D se realizan tres mediciones con medidores humanos que deben realizar el viaje en terreno y medir todos los tiempos relevantes para el viaje (acceso, espera, viaje en bus, transbordo si corresponde y egreso) siguiendo una estrategia definida de antemano.

En la Figura 5.6 se muestra una comparación entre los tiempos estimados en la tabla de viajes y los del termómetro. Para ello se muestra el tiempo según la tabla de viajes tanto para la estrategia sugerida en el termómetro (en rojo) como para todas las estrategias usadas en cubrir ese par O-D (en verde). Al tiempo estimado por el termómetro se le ha descontado la caminata de acceso, espera inicial y caminata de egreso (en azul) para así tener tiempos equivalentes de comparar. Esta comparación se realiza para aquellos pares O-D con más de tres viajes observados en el período Punta Mañana (6:30 – 9:30) de la semana de estudio (19 en total).

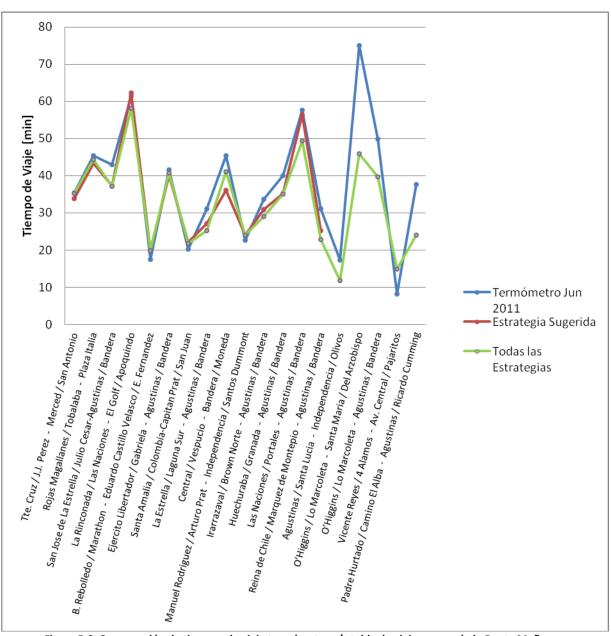


Figura 5.6: Comparación de tiempos de viaje termómetro v/s tabla de viajes, en período Punta Mañana. Fuente: Tiempos termómetro DICTUC, tiempos tabla de viajes elaboración propia.

Dado que en algunos casos la estrategia sugerida puede no ser la única para realizar el viaje, se hace una distinción entre el tiempo de viaje de la estrategia sugerida y todas las estrategias posibles. Se observa que en aquellos pares donde hay viajes con la estrategia sugerida (14 en total), los tiempos de viaje son similares en prácticamente todos los casos. Para aquellos pares donde no hay viajes con la estrategia sugerida pero sí con otras, queda en evidencia que esto sucede porque las estrategias alternativas ofrecen tiempos de viaje notablemente inferiores. La única excepción (el viaje desde Vicente Reyes con 4 Álamos hasta Av. Central con Pajaritos) corresponde a un caso donde el mayor tiempo de viaje se compensa con menor tiempo de caminata.

Otra ventaja de tener etapas caracterizadas a nivel de paradero es que se pueden observar los transbordos. Una medida interesante para analizar la calidad de servicio es el tiempo de transbordo, pero en vez de considerar el tiempo de transbordo individual, se aprovechará la extensión de los datos para obtener medidas agregadas de tiempos de transbordo. Transantiago agrupa ciertos paraderos de gran afluencia y próximos entre sí en entidades

llamadas grupo de paradas, en las cuales hay cantidades importantes de usuarios que transbordan entre servicios de buses y/o metro. En la Tabla 5.2 se muestran los grupos de paradas donde mayor tiempo es consumido en transbordos para la semana de estudio, considerando para ello la hora móvil más cargada de la punta mañana, midiendo en intervalos de media hora entre las 6:30 y 8:30. Cabe destacar que el análisis es realizado de forma que se pueda concluir si el alto consumo de tiempo total por parte de los usuarios se debe a un gran volumen de personas transbordando en el punto o bien por un alto tiempo de transbordo de cada uno.

Tabla 5.2: Grupos de paradas con mayor consumo de tiempo en transbordos, en período Punta Mañana.

Grupo de Paradas	Transbordos [pax/hr]	Lugar	Tpo. Caminata [min/pax]	Tpo. Espera [min/pax]	Tpo. Transbordo [min/pax]	Tpo. Acumulado Transbordo [días/hr]
EIM La Cisterna	10.335	1	4,4	2,4	6,8	47,4
(M) Escuela Militar	5.575	4	3,8	4,9	8,8	33,2
(M) Plaza de Maipú	7.900	2	2,8	3,2	6,0	32,2
Estación Mapocho	5.519	5	2,9	2,7	5,7	21,8
(M) Bilbao	3.542	10	3,1	5,3	8,4	19,7
(M) Las Rejas	6.113	3	2,9	1,6	4,6	19,3
(M) H. Sótero del Río	5.117	6	3,1	1,8	5,0	17,7
(M) Irarrázaval	2.707	14	4,6	3,4	8,0	15,0
(M) Santa Ana	4.100	7	2,9	2,2	5,0	14,3
(M) Santa Rosa	3.640	9	3,1	2,7	5,8	14,3

Como se puede apreciar, hay puntos de transbordo donde el alto consumo de tiempo se debe por el alto volumen de transbordos, mientras que en otros como (M) Escuela Militar o (M) Bilbao es por el alto tiempo de espera que los usuarios experimentan. Esta información tiene utilidad para evaluar medidas de infraestructura (relocalización de paraderos, mejora en accesos o escaleras mecánicas, entre otras) y/o de gestión (mejoras en regularidad, coordinación de transbordos, inyección de buses) en esos puntos. Esto permite evaluar la factibilidad económica de implementarlas en función del ahorro en tiempo por parte de los usuarios que transbordan. Sin perjuicio de lo anterior, hay grupos de paradas que por la cantidad de usuarios que en ellas circula tendrán de forma permanente un alto tiempo acumulado de transbordo, sin que ello implique necesariamente un alto tiempo de transbordo para los pasajeros.

Puesto que lo habitual es que no se los recursos para efectuar todas las mejoras son limitados, hay que priorizar aquellos puntos donde ejecutarlas. Dado que la metodología actual la espera en metro es un valor fijo, la espera que refleja efectos de líneas comunes y buses llenos es la espera a bus. Para determinar los lugares donde los transbordos hacia bus son críticos, se proponen los siguientes criterios para detectarlos:

- Más de 500 [pax/hr] transbordando en la hora móvil crítica.
- Tiempo de transbordo promedio mayor a 7,5 [min] en la hora móvil crítica.

Aplicando los criterios antes descritos, se obtiene un conjunto de puntos de transbordo críticos para el período Punta Mañana, los cuales se muestran en la Tabla 5.3 ordenados por el tiempo de transbordo promedio:

Tabla 5.3: Grupos de paradas críticos, en período Punta Mañana.

Grupo de Paradas	Transbordos [pax/hr]	Lugar	Tpo. Caminata [min/pax]	Tpo. Espera [min/pax]	Tpo. Transbordo [min/pax]	Tpo. Acumulado Transbordo [días/hr]
(M) Tobalaba	1.786	24	4,8	6,6	11,4	13,0
(M) Parque Bustamante	521	62	3,7	7,1	10,8	3,9
(M) Escuela Militar	5.575	4	3,8	4,9	8,8	33,2
(M) Cerro Blanco	530	61	3,0	5,7	8,7	3,2
(M) Bilbao	3.542	10	3,1	5,3	8,4	19,7
(M) Los Dominicos	1.925	21	3,2	4,9	8,1	10,8
(M) Irarrázaval	2.707	14	4,6	3,4	8,0	15,0
P. 38 Vicuña Mackenna	656	51	5,1	2,7	7,8	3,3
(M) Príncipe de Gales	548	57	2,8	4,8	7,6	2,9

Antes de analizar los resultados, hay que tener en cuenta que los tiempos de transbordo en estos puntos estén sobreestimados en algunos casos. La razón por la cual podrían estarlo es debido a que los transbordos en los puntos y horarios definidos en la Tabla 5.3 son mayoritariamente del tipo metro — bus, y en los transbordos de ese tipo si el usuario no aborda el primer tren en alguna de las líneas a las cuales se sube durante su viaje todo el tiempo de espera extra producto de ese fenómeno se imputa a la espera en la superficie, y el fenómeno antes descrito es altamente factible de ocurrir para alguna proporción de los usuarios que realizan transbordos en esos puntos. Bajo el esquema de funcionamiento actual del sistema de transporte es imposible saber la espera exacta de cada usuario cuando utiliza metro. Una corrección a nivel agregado podría aplicarse si es que se tuviera información adicional, específicamente la cantidad promedio de trenes que un usuario debe esperar en cada estación de la red en un tramo horario particular.

A modo de ejemplo, consideremos los transbordos realizados en el grupo de paradas (M) Escuela Militar. De los 5.575 transbordos observados en la hora crítica de la punta mañana, el 9% son de viajes cuya etapa anterior se inició en la línea 5 de metro y realizaron un transbordo en la estación Baquedano para llegar allí. Si suponemos que todos estos usuarios debieron dejar pasar un tren al hacer su transbordo a la línea 1 (situación habitual en esa franja horaria), el impacto en el tiempo promedio de transbordo para este punto es de 0,2 [min], que constituye una disminución de alrededor del 2% en el tiempo de transbordo y del 3,5% del tiempo de espera, respectivamente, que en rigor deberían ser descontados del tiempo mostrado en la Tabla 5.3.

Sin perjuicio de lo anterior, cabe destacar que los resultados mostrados en la Tabla 5.3 muestran en algunos cosas lugares problemáticos no identificados en la Tabla 5.2. Esto es valioso debido a que existen numerosos puntos de la ciudad que tienen una demanda de nivel medio, y las mejoras asociadas a dichos puntos algunas veces quedan postergadas en desmedro de los lugares con mayor afluencia de público, a pesar que para puntos con menor afluencia de usuarios a menudo las medidas son menos costosas y más fáciles de

implementar que para los puntos más masivos. En otras palabras, efectuar múltiples mejoras pequeñas podría a ser más rentable socialmente que una mejora grande, y esta información pretende ser de utilidad a la hora de realizar tal evaluación.

# Análisis comparativo de indicadores de regularidad

Como se indicó en el Capítulo 2, no existe un total consenso acerca de cuál indicador de regularidad para el tiempo de espera representa de mejor manera la experiencia del usuario así como tampoco existe completa claridad de cómo dar incentivos a los operadores para tener una operación que esté en concordancia con la percepción de los usuarios. Cabe recordar que debido al marco regulatorio que rige al sistema de transporte público de Santiago se tiene por único mecanismo de control a los intervalos entre buses de la misma línea, es por ello que en el presente capítulo se intenta orientar cómo enfrentar el problema bajo este supuesto. El análisis se realizará bajo algunos supuestos simplificatorios debido a las limitaciones en la información disponible:

- No se considera el efecto de líneas comunes, debido a que el actual marco regulatorio no posee incentivo alguno para que un operador o grupo de operadores coordinen los despachos de los buses de diferentes líneas a fin de brindar menores tiempos de espera a los usuarios.
- No se considera el efecto de buses llenos en los tiempos de espera, lo cual se debe a la imposibilidad tecnológica de verificar en tiempo real la ocupación de un bus sin realizar una inspección visual.

En el presente capítulo se describirá un conjunto de indicadores que se usan tanto en la literatura especializada como en el estado de la práctica en otras ciudades. La comparación se realizará en términos de su capacidad de reflejar la experiencia del usuario, de su factibilidad de ser calculado por el ente fiscalizador y de la factibilidad de incentivar adecuadamente la operación por parte de las empresas proveedoras del servicio. Finalmente, se propondrá el conjunto de indicadores que se considera que mejor miden la calidad de servicio del transporte público de la ciudad, para que sean implementados en Transantiago de manera permanente, y que pueda ser adoptado por cualquier ciudad que cuente con un esquema de regulación similar.

## 6.1. Descripción de indicadores a utilizar

Luego de la revisión de indicadores de regularidad realizada en el Capítulo 2, se decide hacer un análisis comparativo de un conjunto de ellos que representa las distintas familias de indicadores de regularidad utilizadas alrededor del mundo. En esta comparación se incluye también otros indicadores que se proponen en la literatura y que pretenden representar de mejor manera la experiencia del usuario. Usualmente en los contratos por un servicio de transporte público se establecen períodos en los cuales el operador debe ofrecer una determinada frecuencia. Este es el caso de Transantiago, por lo que es natural considerar medir la regularidad al interior de cada uno de estos períodos, así que los indicadores de

regularidad se calculan para cada servicio – sentido – período en la red, considerando para el aspecto temporal los períodos Transantiago, la cual consiste en una periodización de 48 períodos para tres tipos de días – Laboral, Sábado y Domingo – de duración entre 1 y 4.5 horas cada uno, de salida de los buses. El conjunto de indicadores que se analizarán son tres:

- Suma de incidentes del ICR-I: Indicador utilizado actualmente por Transantiago para medir regularidad en sus servicios siempre que presenten una frecuencia mayor a 5 [bus/hr]; se basa en penalizar aquellos intervalos que sobrepasan un cierto umbral.
- Suma de incidentes del ICR-E: Indicador de regularidad propuesto en los contratos antiguos de Transantiago para servicios con un rango de frecuencia entre 6 y 15 [bus/hr]; está basado en el tiempo de espera en exceso (TEE) y penaliza aquellas situaciones donde este valor supera un cierto umbral.
- TE<sub>95</sub>/h: Definido como la razón entre el percentil 95 del tiempo de espera y el intervalo. Se usa como medida representativa de la percepción del usuario. Se utilizará como referencia puesto que en el Capítulo 2 se reportó que el tiempo de espera de un percentil extremo puede ser representativo de la percepción de variabilidad por parte de los usuarios. Se decide utilizar el percentil 95 porque es un valor que representa la peor experiencia vivida en el mes, en el caso que se utilice el servicio durante los 5 días laborales.

Para efectuar el cálculo del ICR – I, MTT (2012) define el intervalo aceptable como:

$$TA_{jp} = I_{jp}^{PROG} + Hol_{jp}^{ICR-I}$$
 (6.1)

Donde  $I_{jp}^{PROG}$  es el intervalo definido en el programa de operación para el servicio-sentido j en el período p , y  $Hol_{jp}^{ICR-I}$  se define como:

$$Hol_{jp}^{ICR-I} = \max\left[3; \min\left(0.4 \cdot I_{jp}^{PROG}; 10\right)\right]$$
(6.2)

Es decir, el valor de  $Hol_{jp}^{ICR-I}$  tiene una valor de 3 minutos cuando la intervalo es menor o igual a 7,5 minutos y luego crece linealmente con el intervalo programado hasta llegar 10 minutos cuando el intervalo programado es de 25 minutos, valor que se mantiene constante al agrandar el intervalo programado. Luego, un incidente para el intervalo i de un serviciosentido j, período p y punto de control c,  $Inc(ICR-I)_{iinc}$ , se define como:

$$Inc\left(ICR-I\right)_{ijpc} = \left[\max\left(0, I_{ijpc}^{OBS} - TA_{jp}\right)\right]^{\alpha}$$
(6.3)

Donde  $I_{ijpc}^{OBS}$  corresponde el tiempo transcurrido en el intervalo i de un servicio-sentido j, período p y punto de control c, y  $\alpha$  es un mayor siempre mayor a 1 que tiene como función penalizar de forma marginalmente creciente a los intervalos a medida que aumentan por encima de  $TA_{ip}$ ; y en el caso de Transantiago se utiliza  $\alpha=1,5$ . El valor que

conduce a descuentos y que será utilizado para las comparaciones no será exactamente el indicador ICR-I<sup>1</sup>, si no que se utilizará la *suma de incidentes*, que está definido como:

$$SInc(ICR-I)_{jp} = \frac{\sum_{ic} Inc(ICR-I)_{ijpc}}{N(c)}$$
(6.4)

Donde N(c) corresponde a la cantidad de puntos de control a analizar. La ventaja de utilizar la suma de incidentes por sobre el indicador mismo consiste en dos aspectos: el primero es que las multas a los operadores (y por ende los incentivos a mejorar la operación) se dan por la suma de incidentes y no sobre el indicador ICR-I, mientras que el segundo es que mientras el indicador ICR-I penaliza los retrasos de igual manera ya sean pequeños o grandes, la suma de incidentes no sólo penaliza los retrasos según su magnitud, si no que también lo hace de forma exponencial, lo cual es una propiedad deseable del indicador puesto que los retrasos muy grandes son percibidos por el usuario de mucho peor manera que la suma de una serie de atrasos pequeños.

Para el cálculo del ICR – E, indicador propuesto en los contratos de Transantiago similar al utilizado en Londres, se define el tiempo de espera programado como:

$$TE_{jp}^{PROG} = \frac{\overline{I_{jp}^{PROG}}}{2} \left[ 1 + \left( CV_{jp}^{PROG} \right)^2 \right]$$
 (6.5)

Donde  $\overline{I_{jp}^{PROG}}$  es el promedio de los intervalos programados y  $CV_{jp}^{PROG}$  corresponde al coeficiente de variación de los intervalos programados para el servicio-sentido j y período p. Por otro lado, el tiempo de espera observado es el siguiente:

$$TE_{jp}^{OBS} = \frac{\overline{I_{jp}^{OBS}}}{2} \left[ 1 + \left( CV_{jp}^{OBS} \right)^2 \right]$$
(6.6)

Donde  $\overline{I_{jp}^{OBS}}$  y  $CV_{jp}^{OBS}$  es el promedio y coeficiente de variación de los intervalos observados para el servicio-sentido j y período p, respectivamente. Luego, el tiempo de espera en exceso para el servicio-sentido j y período p en el punto de control p0 se define como:

$$TEE_{jpc} = \max \left[ 0, TE_{jpc}^{OBS} - \left( TE_{jpc}^{PROG} + \frac{Hol_{jp}}{2} \right) \right]$$
 (6.7)

Donde  $Hol_{jp}$  se define como en (6.2). Al igual que en el indicador ICR-I, el valor que se ha de analizar es la *suma de incidentes*, que se define en (6.8).

63

.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> El indicador ICR-I corresponde al porcentaje de intervalos que se encuentran por debajo del intervalo aceptable definido en (6.1).

$$\operatorname{SInc}\left(\operatorname{ICR-E}\right)_{jp} = \left(\frac{\sum_{c} TEE_{jpc}}{N(c)}\right)^{2}$$
(6.8)

Nuevamente, la razón por la cual se analizan los incidentes y no el ICR-E<sup>2</sup> es porque es a partir de los incidentes y no del indicador que se cursan las multas, siendo el castigo económico directamente proporcional a SInc. Finalmente, el tercer indicador que se comparará es el percentil 95 del tiempo de espera, el cual se ha documentado que podría tener directa relación con las peores experiencias de los usuarios; a modo de poder establecer comparaciones entre valores de este valor para distintos rangos de frecuencias se utiliza la razón entre el percentil 95 del tiempo de espera y el intervalo (TE<sub>95</sub>/h). Se analiza este indicador pues como se indicó anteriormente, existe evidencia de que los usuarios podrían ser muy sensibles a sus peores experiencias.

# 6.2. Comparación de indicadores

A continuación se estudiará la relación entre los indicadores definidos en la Sección anterior:  $\operatorname{SInc}(\operatorname{ICR-I})$  en dos modalidades según lo definido en (6.3) (con  $\alpha$  = 1,5 y  $\alpha$  = 2), que se definirán I<sup>1,5</sup> e I² respectivamente,  $\operatorname{SInc}(\operatorname{ICR-E})$ , que se denotará como E, y TE<sub>95</sub>/h que se denotará de igual forma. En la Figura 6.1 se muestra la comparación de los valores antes mencionados para todos los paraderos del servicio 201 sentido ida, de todos los despachos del período Punta Mañana (es decir, se analiza cada paradero como si fuera el único punto de control del recorrido).

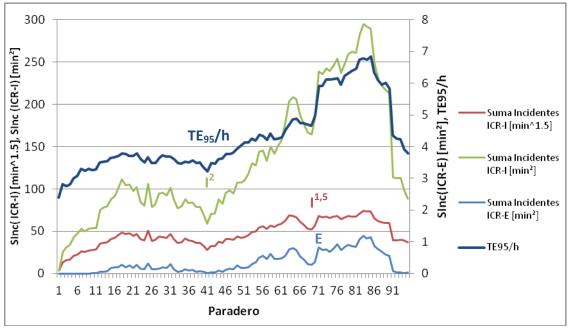


Figura 6.1: Relación entre indicadores de regularidad para todos los paraderos del servicio 2011, en período Punta Mañana.

64

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> El para un servicio-sentido j, período p y punto de control c, el indicador ICR-E es igual a  $\max\left\{1-\frac{\mathrm{TE_{jpc}^{OBS}}}{\mathrm{TEE_{inc}}},0\right\}$ 

En primer lugar, y como es de esperar, se puede apreciar que la irregularidad aumenta a lo largo de la ruta, sin embargo esta no crece de la misma forma dependiendo del indicador con que se esté midiendo; en particular, cuando la irregularidad en los intervalos es alta,  $I^2$  crece explosivamente, mientras que el resto de los indicadores lo hace de una forma más suave; además se aprecia que de forma general, el indicador  $TE_{95}/h$  tiene un comportamiento más estable. Sin perjuicio de lo anterior, la comparación entre  $TE_{95}/h$  y el resto de los indicadores no es tan clara en el formato actual debido a que le rango de valores en que se mueve cada indicador es distinto. Es por ello que el valor de cada uno de cada uno de los indicadores mostrados anteriormente se normalizará según la expresión (6.9):

$$I_{c}^{\text{Normalizado}} = \frac{I_{c}^{\text{Sin Normalizar}}}{\left(\sum_{c'=1}^{N(c)} I_{c'}^{\text{Sin Normalizar}} / N(c)\right)}$$
(6.9)

Donde  $I_c^{
m Normalizado}$  es el indicador de regularidad normalizado (cualquiera de los cuatro estudiados anteriormente para un punto de control c (en este caso, cada paradero),  $I_c^{
m Sin\,Normalizar}$  es el indicador de regularidad sin normalizar y N(c) es la cantidad de puntos de control (en este caso, paradas del servicio); en resumidas cuentas, se normaliza según el promedio simple del indicador obtenido en cada paradero por separado de modo que el área bajo la curva de cada una de ellas sea la misma. En la Figura 6.2 se muestran los mismos indicadores de la Figura 6.1 según la normalización propuesta en (6.9):

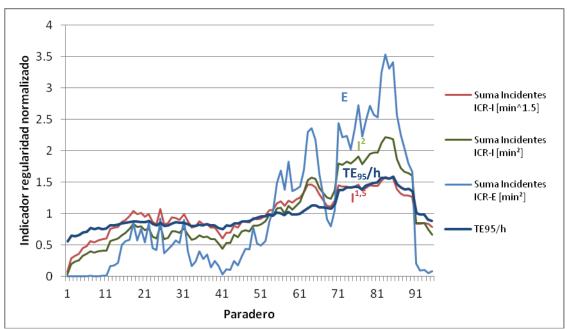


Figura 6.2: Indicadores de regularidad normalizados para todos los paraderos del servicio 2011, en período Punta Mañana.

A partir de lo mostrado en la Figura 6.2 se pueden observar varios fenómenos: el primero es que los indicadores I<sup>1,5</sup>, I<sup>2</sup> y E presentan un cierto rezago en detectar la irregularidad (presumiblemente por la holgura utilizada a la hora de empezar a penalizar), siendo el ICR-E

aquel que más rezago presenta en penalizar la operación irregular. En segundo lugar, todos los indicadores presentan un comportamiento más irregular que  $TE_{95}/h$ , sin embargo el indicador  $I^{1,5}$  presenta un comportamiento más ajustado con este último que  $I^2$  y E. Esto último sumado al hecho que  $I^{1,5}$  y  $I^2$  tienen la misma génesis conceptual permite concluir que  $I^2$  debiera ser descartado como medida de regularidad, puesto que  $I^{1,5}$  representa el mismo principio y a la vez presenta un comportamiento más concordante con la medida que se ha decidido utilizar como referencia de la experiencia del usuario, y lo mismo aplica para descartar el indicador E. Cabe recordar que los datos son obtenidos en base a un servicio en particular en un período específico, por lo que se deben recopilar datos de más servicios en una cantidad mayor de períodos para poder corroborar la solidez de la conclusión obtenida anteriormente.

Luego de esta mirada preliminar, se intentará determinar si existe concordancia entre los distintos indicadores al nivel microscópico de medición, es decir todos los servicio-sentido-período-paradero, que es el nivel con el cual el usuario finalmente experimenta la irregularidad. En primer lugar, se realizarán análisis cruzados para cada par de variables involucradas; en la Figura 6.3 se muestra la relación entre el ICR-I y el ICR-E para un servicio, donde cada punto graficado representa un servicio-sentido-periodo-paradero:

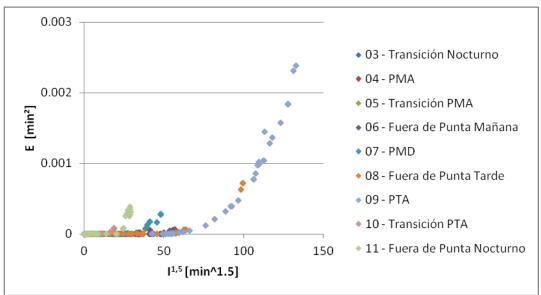


Figura 6.3: E v/s I<sup>1,5</sup>, para el servicio I08I.

Al observar los resultados de la Figura mostrada anteriormente, se pueden observar dos fenómenos: el primero es que hay una cantidad importante de casos donde  $I^{1,5}$  es no nulo (que corresponde a una violación del criterio de regularidad), mientras que bajo el criterio del indicador E sigue estando en una condición aceptable; es decir, el E es un criterio más laxo para evaluar regularidad en el contexto actual. El segundo punto relevante es que, una vez que el criterio E empieza a castigar la regularidad lo empieza a hacer de una forma potencial con respecto al  $I^{1,5}$ . Por otro lado, en la Figura 6.4 se muestra la relación entre los incidentes del  $I^{1,5}$  y TE<sub>95</sub>/h.

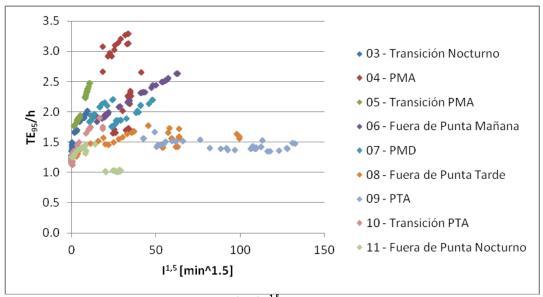


Figura 6.4: TE<sub>95</sub>/h v/s I<sup>1,5</sup>, para el servicio IO8I.

De lo observado en la Figura 6.4 se puede observar que en la mayoría de los períodos existe una relación directa entre ambos indicadores; las excepciones están dadas por los períodos Fuera de Punta Tarde y PTA, donde  $I^{1,5}$  crece mientras  $TE_{95}/h$  no lo hace. Exceptuando los casos antes descritos, el hecho que en general  $I^{1,5}$  esté relacionado con el indicador  $TE_{95}/h$  es un resultado interesante puesto que el indicador  $I^{1,5}$  tiene una génesis más bien operacional mientras que  $TE_{95}/h$  está enfocado en la experiencia y percepción de los usuarios; aunque al analizar en profundidad ambos indicadores se concluye que no es del todo extraña esta concordancia, puesto que el hecho de poder acotar los intervalos (que  $I^{1,5}$  lo hace de forma implícita aumentando el castigo de forma potencial a los intervalos sobre el umbral) indirectamente acota las esperas más grandes (bajo el supuesto que se puede abordar el primer bus). Finalmente, en la Figura 6.5 se muestra la relación entre los indicadores ICR-E y  $TE_{95}/h$ :

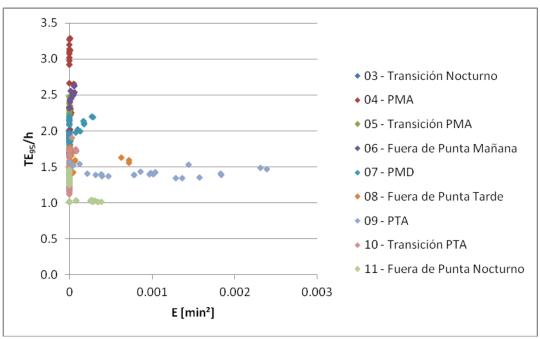


Figura 6.5: TE<sub>95</sub>/h v/s E, para el servicio 1081.

De manera similar a lo sucedido al comparar  $I^{1,5}$  con E, existen muchos casos donde  $TE_{95}/h$  es grande y E es nulo, lo cual da a entender que indicador E de la manera que está definido no recoge fácilmente la experiencia de los usuarios. Además, cuando E es no nulo, no crece de una manera muy clara según crece el valor  $TE_{95}/h$ ; es por las razones esgrimidas anteriormente que se concluye que la relación entre ambos indicadores es escasa.

En función del análisis elaborado en la presente sección, se concluye que, salvo correcciones en las holguras, I<sup>1,5</sup> con E presentan un comportamiento similar frente a la irregularidad de los buses, sin embargo sólo I<sup>1,5</sup> muestra una relación directa con las peores experiencias de los usuarios, relación que el E no ha logrado demostrar, al menos en los casos observados, lo que hace pensar que el I<sup>1,5</sup> es un indicador más ligado con la experiencia del usuario que el E. Si a esto se suma que I<sup>1,5</sup> es un indicador más fácil de implementar y de operar en tiempo real por parte de las empresas, lo cual haría de este indicador el predilecto para evaluar regularidad.

# 7. Conclusiones y futuras líneas de investigación

#### 7.1. Síntesis y conclusiones

En el presente trabajo se muestra el cálculo exitoso de indicadores de calidad de servicio con datos pasivos, recomendados en la literatura y utilizados en la práctica, con gran detalle a nivel espacial y temporal. Al respecto, cabe decir que esta fuente de datos en muchos casos puede ser un reemplazo de las fuentes tradicionales de medición, y en tantos puede ser un complemento, pues permite obtener indicadores de un modo más económico con igual o mayor credibilidad, y haciendo un uso extensivo de la información disponible. También cabe destacar que la información antes obtenida sirve no solamente para efectos de cálculo de indicadores; labores como el monitoreo en tiempo real, fiscalización y planificación del sistema de transporte público, entre otros, se facilitan mediante el uso de esta fuente de información.

Los indicadores calculados son: tiempo de viaje, número de etapas por viaje, distancia euclidiana de viaje, velocidad de viaje de los usuarios, DR/DE, velocidad bus v/s auto y transbordos críticos. Estos indicadores sirven para hacer diagnósticos del funcionamiento del sistema de transporte. Por un lado, se pueden distinguir los sectores bien servidos de los que presentan algún aspecto deficiente en el servicio ofrecido (exceso de transbordos, alto tiempo de viaje, etcétera), y por lo tanto permiten tomar medidas focalizadas en ciertos puntos de la ciudad. Por otro lado, el análisis de velocidades es útil para apreciar el efecto de la prioridad en las vías (sean pistas sólo bus, vías exclusivas o corredores segregados). Finalmente, los análisis también fueron efectuados a nivel temporal, demostrando que la experiencia de viaje de los usuarios presenta variaciones a lo largo del día.

Para poder obtener indicadores confiables al nivel de paradero, tener certeza de que los viajes están correctamente caracterizados es fundamental, es por ello que se colocó especial énfasis en la detección de viajes anómalos. En vista de la cantidad no despreciable de viajes que los filtros de viajes permiten detectar, es claro que el proceso más que un estudio de interés de orden teórico por encontrar inconsistencias ha resultado ser un elemento crucial del proceso de obtención de indicadores. Esto permite concluir que en el futuro se debiera profundizar en el estudio de la detección de viajes anómalos al trabajar con este tipo de información.

También hay que destacar que los criterios propuestos para filtrar viajes anómalos son a priori aplicables en cualquier sistema donde se cuente con datos similares a los de Santiago (salvo ajuste de parámetros). Varios de los criterios desarrollados tienen un alcance mayor al de simplemente filtrar, de hecho pueden ser incorporados a los criterios de separación etapa – viaje. El efecto sobre los viajes podría ser mayor al pensado, pues no sólo se modificaría el viaje anómalo, si no que eventualmente la etapa sospechosa podría encadenarse con etapas

contiguas, generando un reordenamiento de los viajes que sería más preciso que el que se tiene actualmente.

La otra tarea que ha resultado trascendental para calcular los indicadores ha sido la corrección de los tiempos de viaje. Esta tarea debía contemplar dos características propias del sistema de transporte público de Santiago: la primera es que solamente se realizan validaciones en la subida (al contrario de otros sistemas donde la validación se realiza tanto en la subida como en la bajada), mientras que la segunda es que existen varias entidades donde realizar validaciones, cada una con un tratamiento diferente. Aquí, la combinación de datos pasivos de gran calidad con mediciones en terreno y un cálculo con un sustento firme llevan a tener resultados de la experiencia del viaje altamente detallada, mayor que los disponibles en muchos otros sistemas de transporte alrededor del mundo, cuenten con datos pasivos o no.

Debido a que la información obtenida es precisa al nivel de paradero, es posible analizar los transbordos en detalle incorporando el efecto de líneas comunes y buses llenos, lo que permite diagnosticar la causa del mal nivel de servicio ofrecido a los usuarios en algunos de ellos. Mientras en algunos puntos el problema está por alto tiempo de espera, en otros se debe al elevado tiempo de caminata. La posibilidad de identificar el problema en estos puntos entrega ideas para la solución a implementar: mientras el primer caso se soluciona mediante aumentos de frecuencia y/o regularidad de los servicios, los segundos se solucionan mediante medidas de infraestructura.

En esta tesis se ha hecho una revisión de distintos indicadores de regularidad para el sistema de transporte público de Santiago, donde ha quedado en evidencia que por la relación con la experiencia del usuario, de la operación y de la implementación es preferible usar un enfoque de analizar cada intervalo por separado antes de usar medidas agregadas. Además, se vislumbra la posibilidad de construir indicadores de génesis operacional (más fáciles de medir, operar e implementar) que tengan directa relación con la experiencia de los usuarios. Al respecto, cabe destacar que las conclusiones obtenidas son válidas sólo bajo las actuales especificaciones de los distintos indicadores de regularidad, y para tener conclusiones más robustas se debe analizar una mayor cantidad de servicios, tramos horarios y de frecuencia.

Muchos de los resultados obtenidos en la presente tesis han sido incorporados al software ADATRAP, el cual calcula velocidades comerciales a partir de las emisiones GPS de los buses y genera las tablas de viajes utilizadas en la presente tesis. El principal aporte de la tesis al desarrollo de este software consiste en la adición de un módulo que ejecuta las correcciones presentadas en el Capítulo 4 y entrega una serie de reportes generales de indicadores tales como el tiempo de viaje, número de etapas, velocidad de viaje y otros para los viajes realizados en punta mañana a cuatro sectores de la ciudad (centro histórico de Santiago, centro de Providencia, entorno de Escuela Militar y entorno de Portal la Dehesa), el segundo es una refinación de criterios para filtrar viajes que es incorporado al proceso de generación de las tablas de viajes, y el tercero es una propuesta de criterios para mejorar los criterios de corte etapa – viaje.

#### 7.2. Futuras líneas de investigación

La información que no se puede obtener con datos pasivos y que es relevante para caracterizar los viajes (y por ende, para medir calidad de servicio) son tres:

- 1) Determinar los tiempos de acceso y egreso hacia la primera y desde la última etapa del viaje.
- 2) Identificar la espera cuando la primera etapa es realizada en bus.
- 3) Mejorar la información sobre el tiempo de entrada, salida y transbordo en las estaciones de metro.

Para el primer asunto pendiente, se propone incorporar esta componente en un nivel agregado a partir de la cobertura de los servicios, la densidad poblacional y el uso de suelo. Para el segundo hay tres opciones: la más sencilla es agregar el tiempo de espera según el intervalo creado entre el bus abordado y el bus anterior del mismo servicio; como este enfoque obvia el efecto de líneas comunes y bus lleno, esta idea se puede refinar determinando el conjunto de líneas comunes en función de los paraderos de subida y bajada con el problema de la complejidad computacional mediante; finalmente, la tercera opción que incorporaría el efecto de buses llenos es modelar la probabilidad de parada de un bus en función de la ocupación del mismo, lo cual entregaría un resultado a nivel agregado. Finalmente, el tercer punto puede ser mejorado modelando estaciones especiales de forma más detallada; un ejemplo de ello son las estaciones con múltiples entradas y salidas, o las estaciones de transbordo con torniquetes dedicados a alimentar líneas específicas (como la estación Santa Ana, que posee torniquetes que llevan directamente a la Línea 2 y otros a Línea 5). Más aún, podría modelarse el tiempo de caminata desde cada torniquete de cada estación al andén.

Para tener un completo entendimiento de los indicadores de regularidad estudiados, hay tres tareas pendientes: la primera es sensibilizar los parámetros de diseño que podrían alterar los indicadores, que corresponden a la holgura definida en (6.2) y al exponente  $\alpha$  definido en (6.3). Mediante estos cambios de parámetros, el comportamiento de los distintos indicadores puede variar sustancialmente, logrando tener una mayor concordancia con  $TE_{95}/h$ , y por ende con la experiencia de los usuarios. La segunda a considerar es que los análisis fueron efectuados en una cantidad limitada de servicios, por lo que hay que profundizar el análisis cubriendo todos los posibles rangos de frecuencias, demanda y operación posibles de tener en la situación actual. La última tarea pendiente es calcular indicadores de variabilidad para el tiempo de viaje que estén en concordancia con lo concluido en capítulos anteriores y que se presume son medibles con los datos actuales.

Finalmente, y a pesar de no ser un tema directamente relacionado con el cálculo de indicadores, se ha planteado la inquietud de pensar en funcionalidades adicionales de los indicadores calculados. Una tarea importante que no ha sido mencionada es poder definir estándares de calidad de servicio, los cuales con los datos detallados y extensivos calculados en esta tesis permite fijar metas factibles de alcanzar en función del desempeño actual del sistema. Una vez incorporados todos los aspectos enunciados anteriormente, queda pendiente la sistematización para el uso permanente por parte de Transantiago para monitorear la calidad de servicio ofrecida a los usuarios.

#### 8. Bibliografía

Abkowitz, M.D. (1978) Transit Service Reliability. Reporte UMTA-MA-06-0049-78-1. U.S. Department of Transportation Systems Center, Cambridge, Mass.

Abkowitz, M.D. y Engelstein I. (1983) Factors affecting running time on transit routes. *Transportation Research A*, 17, 107-113

Bagchi, M. y White, P. R. (2005) The potential of public transport smart card data. *Transport Policy*, 12, 464–474.

Bates, J., Polak, J., Jones, P. y Cook, A. (2001) The valuation of reliability for personal travel. *Transportation Research E*, 37, 191-229.

Beltrán, P., Gschwender, A., Munizaga, M., Ortega, M. y Palma, C. (2013) Indirect measurement of level of service variables for the public transport system of Santiago using passive data. En: Zmud, J., Lee-Gosselin, M., Munizaga, M.A. y Carrasco, J.A. (Eds.) *Transport Survey Methods: Best Practice for Decision Making*. Emerald, 673-694.

Bertini, R.L. y El-Geneidy, A. (2003) Generating transit performance measures with archived data. *Transportation Research Record*, 1841, 109-119.

Börjesson, M., Eliasson, J. y Frankin, J.P. (2012) Valuations of travel time variability in scheduling versus mean – variance models. *Transportation Research B*, 46, 855 – 873.

Cortés C., Gibson J., Gschwender A., Munizaga M. y Zúñiga M. (2011) Comercial bus speed diagnosis based on gps-monitored data. *Transportation Research C*, 19(4), 695 – 707.

CTA (2013) March 2013 Performance metrics. [en línea] <a href="http://www.transitchicago.com/assets/1/performance metrics/Performance Metrics">http://www.transitchicago.com/assets/1/performance metrics/Performance Metrics - Mar 2013.pdf></a>

Chu, K.K.A., Chapleau, R. y Allard, B. (2011) Synthesizing AFC, APC, GPS and GIS data to generate performance and travel demand indicators for public transit. 90th TRB Annual Meeting (DVD). 23-27 Enero 2011, Washington D.C., Paper 11-2894.

dell'Ollio, L., Ibeas, A. y Cecín, P. (2010) Modelling user's perception of bus transit quality. Transport Policy, 17, 388-397.

dell'Ollio, L., Ibeas, A., Cecín, P. y dell'Ollio, F. (2011) Willingness to pay for improving service quality in a multimodal area. *Transportation Research C*, 19(6), 1060-1070.

DICTUC (2011) Elaboración de Indicadores de desempeño del Sistema de Transporte Público, Etapa II, Orden de Trabajo N°8. Coordinación Transantiago.

Donoso, P., Munizaga, M. y Rivera, J. Measuring user satisfaction in transport services: methodology and application. En: Zmud, J., Lee-Gosselin, M., Munizaga, M.A. y Carrasco, J.A. (Eds.) *Transport Survey Methods: Best Practice for Decision Making*. Emerald, 603 – 623.

DTPM (2011) Informe de Gestión [en línea] <a href="http://www.dtpm.gob.cl/descargas/archivos/Informe%20de%20Gesti%C3%B3n%2020%20">http://www.dtpm.gob.cl/descargas/archivos/Informe%20de%20Gesti%C3%B3n%2020%20%20DE%20NOV.pdf">http://www.dtpm.gob.cl/descargas/archivos/Informe%20de%20Gesti%C3%B3n%2020%20%20%20DE%20NOV.pdf</a> [consulta: 11 de Julio 2013]

DTPM (2012) Programa de Operación primer Semestre 2012 Vigente entre el 01/04/12 – 30/06/12 [en línea] < http://www.dtpm.gob.cl/index.php/plan-operacional-historico2/24-programas-de-operacion/154-programa-de-operacion-primer-semestre-2012-vigente-entre-el-01-04-12-30-06-12> [consulta: 11 de Julio 2013]

DTPM (2013) Informe de Gestión DTPM 2013 [en línea] < <a href="http://www.dtpm.gob.cl/archivos/Memoria%202013-Web Final%20(1).pdf">http://www.dtpm.gob.cl/archivos/Memoria%202013-Web Final%20(1).pdf</a> [consulta: 17 de Abril 2014]

Eboli, L. y Mazzulla, G. (2010) How do capture the passenger's point of view on a transit service through rating and choice options. *Transport Reviews*, 30(4), 435-450.

Eboli, L. y Mazzulla, G. (2012) Performance indicators for an objective measure of public transporte service quality. *European Transport*, Issue 51, Paper n°3.

Fielding, G.J., Babisky, T.T. y Brenner, M.E. (1985) Performance evaluation for bus transit. *Transportation Research A*, 19A(1), 73 – 82.

Fielding, G.J., Glauthier, R.E. y Lave, C. (1978) Performance indicators for transit management. *Transportation*, 7, 365 – 379.

Fosgreau, M. y Karlström, A. (2010) The value of reliability. *Transportation Research B*, 44(1), 38 – 49.

Furth, P.G. y Muller, T.H.J. (2006) Service reliability and hidden waiting time: Insights from Automatic Vehicle Location data. *Transportation Research Record*, 1955, 79-87.

Geurs, K., Haaijer, R. y Van Wee, B. (2006) Option value of public transport: methodology for measurement and case study for regional rail links in the Netherlands. *Transport Reviews*, 26(5), 613-643.

Hensher, D., Stopher, P. y Bullock, P. (2003) Service quality – developing a service quality index in the provision of commercial bus contracts. *Transportation Research A*, 37(6), 499-517.

Jang, W. (2010) Travel time and transfer analysis using transit Smart card data. *Transportation Research Record*, 2144, 142-149.

Lam, T. y Small K. (2001) The value of time and reliability: Measurement from a value pricing experiment. *Transportation Research E*, 37, 231-251.

Lomax, T., Schrank, D., Turner, S. y Margiotta, R. (2003) Selecting travel reliability measures. Texas Transportation Institute, Cambridge Systematics Inc.

MTA (2013) MTA Performance Dashboard April 2013. [en línea] <a href="http://www.mta.info/persdashboard/performance14.html#">http://www.mta.info/persdashboard/performance14.html#</a>> [consulta: 11 de Julio 2013]

MTR (2012) Executive Management's Report: Hong Kong Transport Operations. [en línea] < <a href="http://www.mtr.com.hk/eng/investrelation/2011frpt">http://www.mtr.com.hk/eng/investrelation/2011frpt</a> e/E111.pdf</a>> [consulta: 11 de Julio 2013]

MTT (2012). Contrato al referéndum de concesión de uso de vías para la prestación de servicios de transporte público urbano remunerado de pasajeros mediante buses entre Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones y Subus Chile S.A.

Munizaga, M.A. y Palma, C. (2012) Estimation of a disaggregate multimodal public transport origin-destination matrix from passive Smart card data from Santiago, Chile. *Transportation Research C*, 24(12), 9-18.

New South Wales State Transit (2013) Quarterly Performance Information – March 2013 [en línea] <a href="http://www.statetransit.info/performance-information/quarterly/2013%20-%201ST%20QUARTER.pdf">http://www.statetransit.info/performance-information/quarterly/2013%20-%201ST%20QUARTER.pdf</a> [Consulta: 11 de Julio de 2013]

Noland, R.B. y Small, K.A. (1995) Travel time uncertainty, departure time and the cost of the morning commute. *74th TRB Annual Meeting*, Washington D.C.

Ortúzar, J. de D., Ivelic, A.M., Candia, A., Stopher, P.R. y Lee – Gosselin, M. (1997) User perception of public transport level of service. *Understanding Travel Behavior in an Era of Change*. Elsevier, 123 – 142.

Osuna, E.E y Newell, G.F. (1972) Control strategies for an idealized public transportation system. *Transportation Science*, 6, 52-72.

Park, J.Y., Kim, D.-J. y Lim, Y. (2008) Use of smart card data to define public transit use in Seoul, Korea. *Transportation Research Record*, 2063, 3-9.

PTC (2013) Results of 6-Monthly QoS Performances (Jun-Nov 2012) [en línea] < <a href="http://www.ptc.gov.sg/FactsAndFigures/resultsOf6monthQOSPerformance.htm">http://www.ptc.gov.sg/FactsAndFigures/resultsOf6monthQOSPerformance.htm</a> [Consulta: 11 de Julio de 2013]

Raveau, S., Guo, Z., Muñoz, J.C. y Wilson, N.H.M. (2014) A behavoural comparison of route choice on metro networks: Time, transfers, crowding, topology and socio – demographics. *Transportation Research A*, 66, 185 – 195.

Schneider, C. (2013) Análisis de la influencia de distintos tipos de prioridad al transporte público y del ancho de vía a través de modelos lineales de tiempo de viaje utilizando datos del sistema de transporte público de Santiago. Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Transporte. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 89p.

Strathman, J. y Hopper, J. (1993) Empirical analysis of bus transit on-time performance. *Transportation Research A*, 27, 93-100.

Strathman, J.G., Kimpel, T.J. y Callas, S. (2003) Headway deviation effects on bus passenger loads: Analysis of tri-met's archived AVL-APC data. Portland State University Center for Urban Studies, Report No. PR126.

TfL (2013). London Buses Quality of Service Indicators: Route results for London Buses Services, Fourth Quarter 2012/13. [en línea] <a href="http://www.tfl.gov.uk/tfl/businessandpartners/buses/boroughreports/borough-n-network/current-quarter.pdf">http://www.tfl.gov.uk/tfl/businessandpartners/buses/boroughreports/borough-n-network/current-quarter.pdf</a>> [Consulta: 2 de Julio de 2013]

TRB (2003a) A guidebook for developing a transit performance-measure system. TCRP Report 88, National Research Council, Washington, D.C.

TRB (2003b) *Transit Capacity and Quality of Service Manual.* TCRP Report 100, National Research Council, Washington, D.C.

Trépanier, M., Morency, C. y Agard, B. (2009) Calculation of Transit Performance Measures Using Smartcard data. *Journal Of Public Transportation*, 12(1), 79-96.

Trompet, M, Liu, X. y Graham, D.J. (2011) Development of key performance indicator to compare regularity of service between urban bus operators. *Transportation Research Record*, 2216, 33-41.

Tyrinopoulos, Y. y Antoniou, C. (2008) Public transport user satisfaction: variability and policy implications. *Transport Policy*, 15(4), 260-272.

Utsunomiya, M., Attanucci, J. y Wilson N. (2006) Potential Uses of Transit Smart Card Registration and Transaccion Data to Improve Transit Planning. *Transportation Research Record*, 1971, 119-126.

Yáñez, M. F., Raveau, S. y Trtúzar, J. de D. (2010) Inclusion of latent variables in Mixed Logit models: Modelling and forecasting. *Transportation Research A*, 44, 744 – 753.

### Anexos

#### A.1 : Tiempos de caminata en estaciones de Metro

Línea	Estación	Tiempo Acceso [seg]	Tiempo Egreso [seg]
Línea 1	San Pablo	38	38
Línea 1	Neptuno	38	38
Línea 1	Pajaritos	38	38
Línea 1	Las Rejas	38	77
Línea 1	Ecuador	38	77
Línea 1	San Alberto Hurtado	38	77
Línea 1	U. de Santiago	38	77
Línea 1	Estación Central	38	77
Línea 1	U. Latinoamericana	38	77
Línea 1	República	38	77
Línea 1	Los Héroes	38	77
Línea 1	Moneda	38	77
Línea 1	U. de Chile	38	101
Línea 1	Santa Lucía	38	77
Línea 1	U. Católica	38	77
Línea 1	Baquedano	38	77
Línea 1	Salvador	38	38
Línea 1	Manuel Montt	38	77
Línea 1	Pedro de Valdivia	38	77
Línea 1	Los Leones	38	77
Línea 1	Tobalaba	38	101
Línea 1	El Golf	38	77
Línea 1	Alcántara	38	77
Línea 1	Escuela Militar	38	77
Línea 1	Manquehue	37	101
Línea 1	H. de Magallanes	37	101
Línea 1	Los Domínicos	37	101

Línea	Estación	Tiempo Acceso [seg]	Tiempo Egreso [seg]
Línea 2	Vespucio Norte	42	122
Línea 2	Zapadores	42	122
Línea 2	Dorsal	42	122
Línea 2	Einstein	42	122
Línea 2	Cementerios	42	122
Línea 2	Cerro Blanco	42	122
Línea 2	Patronato	42	122
Línea 2	Cal y Canto	50	122
Línea 2	Santa Ana	42	79
Línea 2	Los Héroes	66	122
Línea 2	Toesca	50	79
Línea 2	Parque O'Higgins	74	43
Línea 2	Rondizzoni	50	79
Línea 2	Franklin	42	110
Línea 2	El Llano	42	66
Línea 2	San Miguel	42	66
Línea 2	Lo Vial	42	66
Línea 2	Departamental	42	66
Línea 2	Ciudad del Niño	42	66
Línea 2	Lo Ovalle	42	66
Línea 2	El Parrón	42	122
Línea 2	La Cisterna	42	110

l'ann	Filedás	Tiempo Acceso	Tiempo Egreso
Línea	Estación	[seg]	[seg]
Línea 4	Plaza de Puente Alto	55	123
Línea 4	Las Mercedes	55	123
Línea 4	Protectora de la Infancia	43	71
Línea 4	Sótero del Río	68	123
Línea 4	Elisa Correa	43	71
Línea 4	Los Quillayes	43	71
Línea 4	San José de la Estrella	43	71
Línea 4	Trinidad	43	71
Línea 4	Rojas Magallanes	43	71
Línea 4	Vicente Valdés	55	123
Línea 4	Vicuña Mackenna	75	123
Línea 4	Macul	43	71
Línea 4	Las Torres	33	155
Línea 4	Quilín	43	71
Línea 4	Los Presidentes	33	155
Línea 4	Grecia	33	74
Línea 4	Los Orientales	33	128
Línea 4	Plaza Egaña	33	74
Línea 4	Simón Bolivar	33	128
Línea 4	Príncipe de Gales	33	128
Línea 4	Francisco Bilbao	33	128
Línea 4	Cristóbal Colón	33	128
Línea 4	Tobalaba	139	187
Línea 4A	La Cisterna	118	172
Línea 4A	San Ramón	96	104
Línea 4A	Santa Rosa	37	81
Línea 4A	La Granja	96	104
Línea 4A	Santa Julia	96	104
Línea 4A	Vicuña Mackenna	96	104

Línea	Estación	Tiempo Acceso [seg]	Tiempo Egreso [seg]
Línea 5	Plaza de Maipú	51	166
Línea 5	Santiago Bueras	95	126
Línea 5	Del Sol	51	85
Línea 5	Monte Tabor	102	106
Línea 5	Las Parcelas	102	106
Línea 5	Laguna Sur	102	106
Línea 5	Barrancas	95	126
Línea 5	Pudahuel	95	126
Línea 5	San Pablo	95	126
Línea 5	Lo Prado	95	126
Línea 5	Blanqueado	95	126
Línea 5	Gruta de Lourdes	95	126
Línea 5	Quinta Normal	51	126
Línea 5	Cumming	51	85
Línea 5	Santa Ana	51	126
Línea 5	Plaza de Armas	51	126
Línea 5	Bellas Artes	51	85
Línea 5	Baquedano	95	126
Línea 5	Parque Bustamante	51	85
Línea 5	Santa Isabel	51	85
Línea 5	Irarrázaval	51	85
Línea 5	Ñuble	37	50
Línea 5	Rodrigo de Araya	37	50
Línea 5	Carlos Valdovinos	37	50
Línea 5	Camino Agrícola	37	50
Línea 5	San Joaquín	37	50
Línea 5	Pedrero	37	50
Línea 5	Mirador	37	50
Línea 5	Bellavista de La Florida	51	85
Línea 5	Vicente Valdés	51	126

## A.2 : Tiempo de caminata utilizado en transbordos entre estaciones de metro

Estación	Línea Bajada	Línea Subida	Tiempo de Caminata [seg]
Baquedano	L1	L5	133
Baquedano	L5	L1	142
La Cisterna	L2	L4A	220
La Cisterna	L4A	L2	212
Los Héroes	L1	L2	84
Los Héroes	L2	L1	97
San Pablo	L1	L5	138
San Pablo	L5	L1	146
Santa Ana	L2	L5	92
Santa Ana	L5	L2	115
Tobalaba	L1	L4	124
Tobalaba	L4	L1	156
Vicente Valdés	L4	L5	90
Vicente Valdés	L5	L4	122
Vicuña Mackenna	L4	L4A	73
Vicuña Mackenna	L4A	L4	78

### A.3 : Errores de estimación de niveles de servicio en zonas pagas

Como se explicó en la Sección 4.1, existen 3 entidades donde realizar una validación: paradero, metro y zona paga. Esta última tiene dos características de funcionamiento que la hacen particular: la primera es que el usuario valida antes del subir al bus y la segunda es que no se sabe a priori el servicio que el usuario va a abordar; ya que el conjunto de líneas que el usuario podría abordar no sólo depende del lugar donde está abordando el bus si no que también del lugar donde desea bajar.

La metodología de estimación de viajes asume que el usuario aborda el primer bus que le sirve entre aquellas líneas que son comunes para este, sin consideración alguna sobre la ocupación del bus, así como tampoco considera el hecho de que bus asignado pudo no haberse detenido. Como consecuencia de lo anterior, no es posible afirmar fehacientemente que el tiempo de viaje estimado por la metodología sea el realmente experimentado por aquel usuario (pues no necesariamente abordo el bus que se le imputó).

A pesar de lo anterior, se considera que en un viaje de varias etapas estas discrepancias son subsanables si es que sólo una etapa fue realizada en zona paga (pues las correcciones efectuadas en la Sección 4.1.2 permiten atenuar las diferencias). Sin embargo, si en un viaje se realizan dos etapas consecutivas en zonas pagas, la estimación del viaje de ese usuario se encuentra tan distorsionada que ni siquiera las correcciones permiten darle credibilidad al tiempo de viaje.