

MODELO DE TIEMPO DE VIAJE PARA DISTINTOS ESQUEMAS DE PRIORIDAD PARA BUSES EN LA CIUDAD DE SANTIAGO

Ricardo Cubillos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile,
rcubillos@ing.uchile.cl

Marcela A. Munizaga, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile,
mamuniza@ing.uchile.cl

RESUMEN

El tiempo de recorrido de buses (o velocidad) es muy relevante tanto para los usuarios del transporte público como para los operadores. Diferentes razones hacen que su valor mejore o empeore y en este trabajo se busca contribuir en la comprensión del tiempo de recorrido en distintos tipos de esquemas de prioridad como tráfico mixto, pistas sólo bus y corredores segregados. Se desarrollaron modelos econométricos que indican variables explicativas al ahorro o empeoramiento del tiempo de cruce, demora en paraderos y demora en intersecciones, cuantificando su impacto. Se determinan claras diferencias en la velocidad en donde a mayor segregación, hay mejor velocidad y además se encuentran variables poco intuitivas como la reducción por pasajero en paraderos con zonas pagas, el número de pistas totales para la implementación de pistas sólo bus y el flujo de buses para el corredor.

Palabras claves: Velocidad de buses, transporte público, prioridad para buses

ABSTRACT

Bus travel time is an important variable to study because of its relevance for transit's users and operators. Different reasons makes this value to increase or decrease and in this study an effort to contribute in the comprehension of bus travel time is made, focused on different priority schemes such as mixed traffic, reserved bus lanes and median busways. An econometric model was developed identifying explanatory variables for cruising time, bus stop delays and intersection delays. Coherence between speed and level of segregation is found, where non intuitive variables are found, such as the reduced time per passenger at pre-paid stations, the total number of lanes where bus lanes exist and the bus flow as a variable for the travel time in median busways.

Keywords: bus travel time, transit, priority schemes

1. INTRODUCCIÓN

El tiempo de recorrido de los buses, entendido como el tiempo que demora en recorrer un bus un kilómetro de distancia (inverso de la velocidad), ha sido constantemente objeto de estudio debido a su relación con los usuarios del sistema de buses, por ser un importante indicador de la calidad de servicio. Además, para los operadores de buses es importante por estar relacionado con los costos.

El reducir el tiempo de recorrido para los buses es un asunto de interés común y para eso existen distintas medidas que pueden ser aplicadas, como segregar los buses con respecto al resto del tráfico, aumentar las velocidades máximas permitidas de los buses, aplicar distintos métodos para recaudación de tarifas, mejorar diseño de paraderos, sincronizar los semáforos, aumentar el número de pistas, entre otras. La innovación, creatividad y tecnologías se conjugan para permitir que esto ocurra. Para poder evaluar medidas alternativas, es necesario determinar el efecto de distintas variables que inciden en que un bus vaya más o menos rápido, considerando sus tres componentes básicas: tiempo de crucero, demora en paraderos y demora en intersecciones.

La literatura ha tratado de explicar este fenómeno. La demanda en paraderos, tanto subidas y bajadas, aparecen como una variable relevante en repetidos estudios. (Ma et al., 2015) encontró una relación cuadrática de las subidas para explicar la demora en paraderos con el tiempo de servicio. También lo han sido las intersecciones semaforizadas (Abkowitz y Engelstein, 1983; Tirachini, 2013; Gibson et al., 2015); (Strathman et al., 1999); Ma et al. 2015; Feng et al., 2015. (Ma et al., 2015) encuentra que disminuye el tiempo de viaje si los buses salen atrasados de los paraderos, además se ha observado que el intervalo programado (Strathman et al., 1999), la experiencia del conductor o los años de experiencia de los operadores (Kimpel et al., 2005; Surprenant-Legault y El-Geneidy, 2011) y si el bus es troncal o alimentador (Strathman et al., 2002) afectan en el tiempo de recorrido. Otros efectos también son medidos como efectos climáticos (lluvia y nieve) (Ma et al., 2015; Surprenant-Legault and El-Geneidy, 2011) y la incorporación de distintas medidas de prioridad como TSP (Diab y El-Geneidy, 2012; Kimpel et al., 2005) y también SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System) (Slavin et al., 2013). Con respecto a la infraestructura, se han encontrado resultados como el comportamiento de la velocidad en distintos tipos de vías (Zhang et al., 2014), la presencia de pistas sólo bus (Surprenant-Legault y El-Geneidy 2011), corredores segregados (Zhang et al., 2014; Gibson et al., 2015; Ma et al., 2015).

Dada la existencia de variada literatura que intenta explicar la velocidad de los buses, el objetivo de este trabajo es calibrar un modelo general para la ciudad de Santiago, abarcando varios ejes que contengan los distintos tipos de infraestructura prioritaria que existen para facilitar la circulación de buses, incluyendo además servicios expresos y las denominadas zonas pagas, que son paraderos en donde la tarifa se recauda fuera del paradero, y los buses funcionan poseen subida y bajada simultánea por todas las puertas.

2. DESCRIPCIÓN DEL CASO EN ESTUDIO

Los datos utilizados en este estudio provienen de dos fuentes de operación del sistema de transporte público de Santiago, Transantiago. Desde su implementación el único medio de pago en buses es la *Smartcard* (bip!) y todos los buses están equipados con dispositivos GPS que emiten su ubicación cada 30 segundos. Trabajo previo ha permitido generar una matriz origen-destino paradero a paradero, estimando cuantas subidas y bajadas hay en cada bus (Munizaga y Palma, 2012). También se ha calculado las trayectorias en el tiempo de los buses (Cortés et al., 2011), de modo de estimar sus velocidades en distintos tramos de una grilla espacio-tiempo dada. Este trabajo se basa en datos del período comprendido entre el 23 y 27 de Septiembre de 2013, entre las 06:30 AM y 21:30 PM, agregados en períodos de media hora.

Con respecto a la infraestructura, el tráfico mixto no considera ningún tipo de prioridad a los buses por sobre otros vehículos, las pistas sólo bus están localizadas a la derecha de la calle (sean una o dos) y están demarcadas en el suelo y con señalética. Está permitido que vehículos de cualquier tipo ingresen en caso de necesitar acceder a alguna actividad en el borde de la

calzada o realizar virajes a la derecha. Los segmentos de corredor segregado corresponden a vías centrales segregadas físicamente de una pista con bahía para buses en paraderos (pista de adelantamiento) en donde sólo circulan buses del transporte público.

Para este trabajo, se utilizó la información de tres ejes que cruzan importantes fracciones de Santiago: Carmen – Las industrias, Macul – J.P. Alessandri-Los Leones y Grecia – Matta. A través de estos ejes, se encuentran tramos con tráfico mixto, pista sólo bus, dos pistas sólo bus y corredores segregados para buses. Además hay presencia de dos paraderos con zonas pagas en 27.02 kilómetros de largo de rutas. La operación es en distintos tipos de servicio, desde servicios que operan normalmente en todos los períodos, servicios expresos y servicios que operan sólo en horarios punta. La Tabla 1 muestra una descripción agregada de los tramos en cuanto a infraestructura y presencia de intersecciones semaforizadas.

Tabla 1: Descripción general de ejes a analizar

	Carmen- Industrias [N - S]	Macul - Los Leones [S -N]	Matta - Grecia [OR - PO]
Largo Total [km]	7.70	8.67	10.65
N° de Tramos	7	8	9
Largo Promedio por Tramo	1.1	1.08	1.18
N° de Servicios	2	4	8
Semáforos/km	3.51	3.11	4.79

Para analizar de manera adecuada la variable a estudiar, se propone separar los ejes en tramos basado en los siguientes criterios que ya fueron propuestos por (Gibson et al., 2015) :

- 1) Que el tramo tenga un mismo perfil geométrico, es decir, tipo de prioridad y número de pistas.
- 2) Que dentro del mismo tramo circulen los mismos servicios de buses, es decir, que ningún servicio entre o salga en medio del tramo.
- 3) Los límites entre tramos estén definidos a más de 200 [m] de posibles puntos de interés como intersecciones semaforizadas, paraderos y que si hay algún tipo de intersección o punto importante (rotonda, centro comercial, etc.) esté bien encasillado dentro de un tramo.
- 4) Considerar el largo de cada tramo dentro de un rango acotado, cercano a los 1.000[m]. En caso de haber tramos más cortos o más largos, será justificado debidamente, lo cual de todas formas es corregido porque todas las variables asociadas al largo son normalizadas por el largo del tramo.

Aplicando esta metodología en segmentos, es posible comparar el comportamiento del tiempo de recorrido bajo distintas características ya que se incorporarán en el mismo modelo los distintos tramos. La Figura 1 muestra una perspectiva del escenario, en donde se aprecia que los tres ejes cruzan importantes sectores de la ciudad. La mayor cantidad de kilómetros corresponde a pistas sólo bus, seguido por corredores y luego tráfico mixto. En la Figura 2 se muestran los hitos que demarcan los límites entre tramos, en donde se tienen 4 tramos de tráfico mixto, 10 tramos de pista sólo bus, 1 tramo de dos pistas sólo bus y 10 tramos de corredor segregado, como se muestra en la Tabla 2.

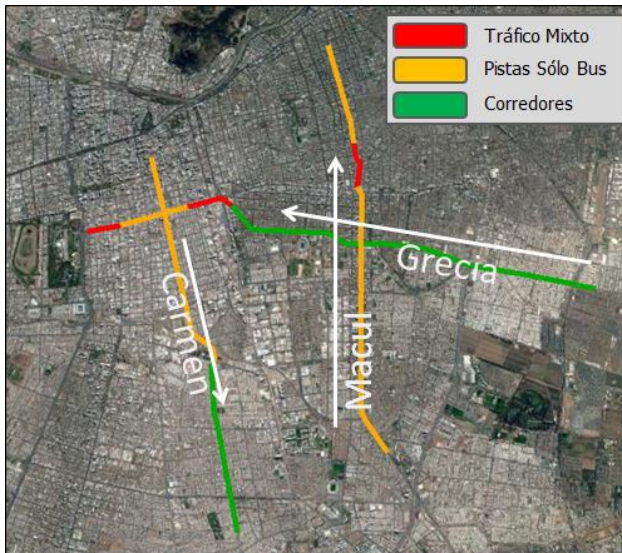


Figura 1: Vista de ejes a analizar indicando tipos de prioridad para buses

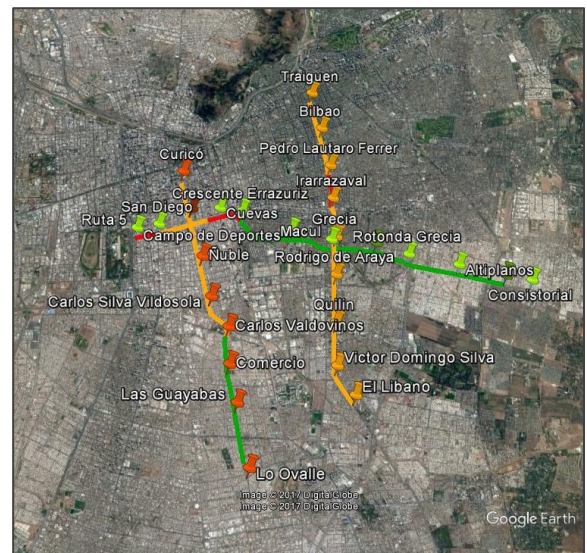


Figura 2: Vista de ejes analizados indicando límites de tramos en los que son separados

Tabla 2: Descripción de prioridad para cada Tramo

Macul - Los Leones		Carmen - Las Industrias		Matta- Grecia	
Tramo	Prioridad	Tramo	Prioridad	Tramo	Prioridad
1	1 Pista Sólo Bus	1	1 Pista Sólo Bus	1	Corredor
2	1 Pista Sólo Bus	2	1 Pista Sólo Bus	2	Corredor
3	1 Pista Sólo Bus	3	1 Pista Sólo Bus	3	Corredor
5	1 Pista Sólo Bus	4	Corredor	4	Corredor
6	Tráfico Mixto	5	Corredor	5	Corredor
7	1 Pista Sólo Bus	6	Corredor	6	Corredor
		7	Corredor	7	Tráfico Mixto
				8	2 Pistas Sólo Bus
				9	Tráfico Mixto

Las velocidades que se observan durante el día para los distintos tramos varían mucho, tanto en distintos ejes como dentro del mismo. En las Figuras 4, 5 y 6 se pueden observar estos valores para los distintos ejes. Es necesario observar, en primera instancia, cada eje por separado y detectar posibles conflictos o períodos de interés en cada uno de los tramos.

Es posible detectar en el eje Macul – Los Leones (ver Figura 4) dos tramos con velocidades excesivamente bajas debido a la presencia de niveles de congestión muy altos. El Tramo 4 posee un conflicto debido al diseño del cruce de Avenida Macul con Avenida Grecia, se genera una demora excedente excesivamente alta, al estar el paradero aguas arriba de la intersección y tener un conflicto con peatones y vehículos que viran hacia la derecha. Se puede ver que el Tramo 8 tiene velocidades muy bajas en la punta mañana. Esto posiblemente se deba a que está muy cerca del centro financiero (CBD), siendo uno de los puntos más congestionados de toda la ciudad (ver Figura 3). Esto genera demoras excedentes por sobre congestión de valores muy altos, generando tiempos de recorrido que no se explican por otras causas. Debido a esto, dichos tramos no serán considerados en el análisis, ya que las velocidades llegan a niveles menores a la velocidad de caminata (menor a 5 km/h).



Figura 3: Esquema eje Macul - Los Leones

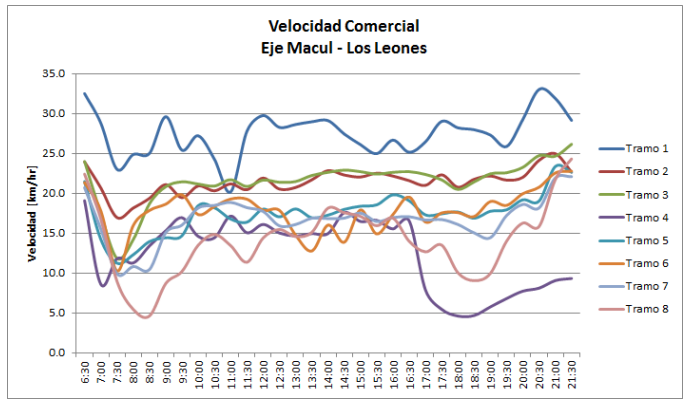


Figura 4: Velocidad Comercial Eje Macul - Los Leones

La Figura 6 muestra las velocidades del eje Matta – Grecia. Se puede ver, como era de esperarse, que el corredor posee valores más altos de velocidad durante el día, mientras el tráfico mixto y pistas sólo bus tienen valores más bajos. Sin embargo, existe una diferencia clara dentro del mismo corredor, con tramos de muy alta velocidad y otros, que si bien son superiores a las otras prioridades, son más moderadas. Esto se debe principalmente a la cantidad de movimiento de pasajeros y detenciones que se efectúan en estos tramos. Por otra parte, en los tramos 7 y 9 se observan niveles de velocidades muy bajas en períodos punta. Estos se deben a problemas de congestiones por demora excedente, aunque no tan severos como en el caso de Macul.

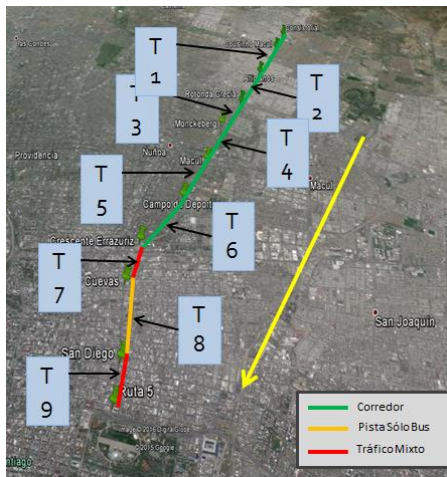


Figura 5: Esquema eje Matta - Grecia

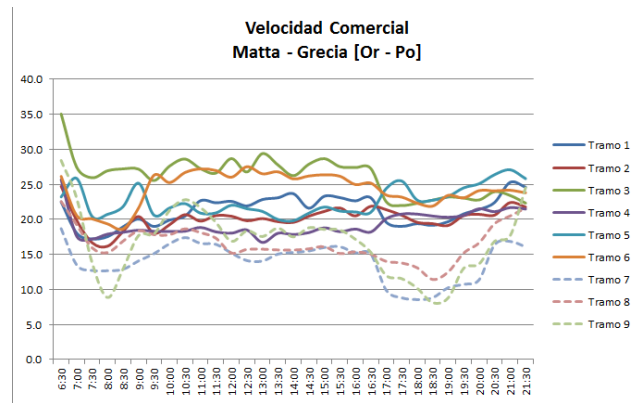


Figura 6: Velocidad Comercial Eje Matta – Grecia

La Figura 8 muestra las velocidades del eje Carmen – Las Industrias. Se puede ver que los tramos más cercanos al centro de la ciudad (1 y 2) son, en promedio, los de menor velocidad durante el día. Peculiar es el caso del Tramo 4, que tiene velocidades muy elevadas. Esto se debe a que la demanda en este tramo es casi nula, tanto de subida como bajada durante todo el día y posee baja densidad de paraderos e intersecciones semaforizadas.



Figura 7: Esquema eje Carmen - Las Industrias

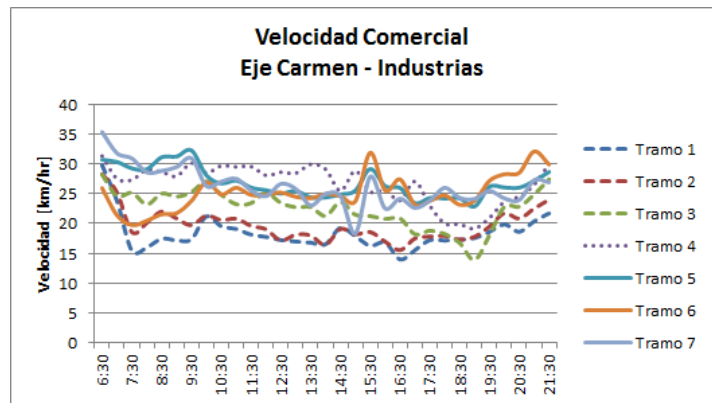


Figura 8: Velocidad Comercial Eje Carmen - Las Industrias

3. MODELACIÓN

Con el objetivo de evaluar correctamente cada uno de los componentes del tiempo de recorrido, se generarán modelos de regresión lineal múltiple, en donde se tiene una variable dependiente, $Y(X)$ explicada por distintas variables independientes, x_i , que van multiplicados por sus coeficientes β_i . Estos últimos, permiten identificar el efecto marginal de cada una de las variables.

$$Y(X) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (1)$$

3.1 Variable Dependiente: Tiempo de recorrido de los buses

Existen distintas formas de modelar la velocidad de los buses, en donde la variable dependiente puede ser la velocidad, el tiempo de viaje en unidades de tiempo o el tiempo de recorrido (inverso de la velocidad). En este caso se utilizará este último, dado que tiene un comportamiento más estable que la velocidad. Las observaciones de buses se agregarán por tramo, período (de 30 minutos) y día de la semana. Además, se separa por tipo de servicio en caso de existir servicios normales y expresos (servicios que se detienen en un número limitado de paraderos).

La ecuación (2) muestra la definición de la variable dependiente, en donde se calcula una media de tiempo de recorrido para un cierto día-tramo-período en cada uno de los ejes, sumando los tiempos de todos los buses observados en ese día-tramo-período y se divide por la suma de todas las distancias de las observaciones que cumplan las condiciones de cada observación en cuestión. Esto es posible, ya que los datos observados de la grilla espacio-tiempo entrega la distancia y tiempo para cada bus en cada celda (tramo y período).

$$\text{Tiempo de Recorrido } (TR)_{edtps} = \frac{\sum_k \text{tiempo}_k}{\sum_k \text{distancia}_k} \quad \forall k \in \{\text{observaciones}\}_{edtps} \quad (2)$$

Donde:

e : eje

d : día

t: tramo

p: período

s: tipo de servicio

Analizando outliers, se encontró que para ciertos día-tramo-período existían valores muy elevados del tiempo de viaje, los cuales fueron removidos y considerados como incidentes. Estos representan menos del 2,5% de los datos totales. Sólo se aplicó con velocidades muy bajas, asumiendo que un motivo externo afecta en su circulación normal (sea accidente, cierre de pista o algún hecho anormal a la regularidad).

Los valores promedio, máximo y mínimo para los tiempos de recorrido se muestran en la Tabla 3. Tanto los valores mínimos, máximos y promedios son de menor valor para los tramos con corredor, mientras que los tramos con valores más altos corresponden a los de tráfico mixto. Es interesante ver que el Tramo 4 de Carmen tiene valores muy bajos siendo que es pista sólo bus, pero no posee paraderos y pocos semáforos, por lo que los buses circulan casi libremente por ese segmento en particular. Por otra parte, en el Tramo 7 de Matta – Grecia se observa un valor muy elevado para el máximo, lo que se explica en la punta tarde en donde la congestión alcanza niveles críticos.

Tabla 3: Descripción estadística del tiempo de recorrido [s/km] para cada tramo

Macul - Los Leones				Carmen - Las Industrias				Matta - Grecia			
Tramo	Prom	Min	Max	Tramo	Prom	Min	Max	Tramo	Prom	Min	Max
1	129.9	101.6	171.2	1	188.3	107.6	239.0	1	166.7	108.9	216.2
2	168.4	135.0	227.5	2	180.5	106.2	236.2	2	174.8	96.1	276.6
3	170.7	127.0	328.9	3	160.5	103.1	238.6	3	140.9	101.5	178.6
5	209.0	144.6	349.5	4	138.5	102.8	224.5	4	183.0	118.0	242.5
6	193.8	145.3	264.5	5	134.0	99.8	184.7	5	151.1	100.2	204.8
7	217.9	149.0	389.3	6	145.7	98.6	221.4	6	146.1	75.0	212.3
				7	138.4	98.4	193.9	7	266.1	135.6	739.8
								8	203.5	107.9	312.7
								9	217.1	119.1	443.0

3.2 Variables Dependientes

Para determinar las variables dependientes que se usarán en el modelo, resulta práctico identificar el tiempo de recorrido en sus tres componentes básicas: tiempo de cruce (TC) (mientras el bus está en movimiento), demora en paraderos (DP) y demora en intersecciones (DI) tal como muestra la ecuación (3). Cada uno de estos componentes tendrá variables que expliquen su relación con la variable dependiente.

$$TR = TC + DP + DI \quad (3)$$

El tiempo de cruce será explicado por el número de pistas totales, distintos tipo de prioridad, flujo de buses (dentro del corredor) y dummies relacionadas al sobreflujo de vehículos (en donde buses interactúan con otros vehículos). La demora en paraderos será modelada a partir del número de detenciones que hagan los buses, número de subidas, bajadas y si existe o no presencia de zonas pagas. La demora en intersecciones es modelada a partir del número de intersecciones semaforizadas y con dummies que expliquen sobre flujo vehiculares, por ende demora excedente en intersecciones. La Tabla 4 resume cada una de estas variables.

Tabla 4: Definición de variables independientes

Nombre variable	Unidades	Definición
Servicio Expreso	-	Observaciones que corresponden sólo a servicios expresos
Corredor de Buses	-	Dummy que indica a observaciones en corredor de buses
Pistas Totales (SB)	pistas	Número de pistas totales en el caso de existencia de alguna pista sólo bus
Dós pistas sólo bus	-	Dummy que indica presencia de dos pistas sólo bus
Flujo de buses	buses/hr	Flujo de buses totales. Sólo se utiliza para corredores segregados.
Semáforos	semáforos/km	Número de intersecciones semaforizadas por kilómetro para cada tramo
Subidas	subidas/bus-km	Número de subidas promedio por bus, dado un día-tramo-período
Bajadas	bajadas/bus-km	Número de bajadas promedio por bus, dado un día-tramo-período
Detenciones	detenciones/bus-km	Número de detenciones promedio por bus, dado un día-tramo-período
Subidas(ZP)	subidas/bus-km	Número de subidas promedio por bus en Zonas Pagas, dado un día-tramo-período
Periodo (xx:xx - yy:yy)	-	Dummy que indica un período en particular.
<i>Eje.Tramo.(XX.XX - YY:YY)</i>	-	Dummy que indica presencia de congestión para cierto tramo en determinados períodos.

Dado que la variable dependiente es un agregado de varias observaciones, lo mismo debe hacerse para las variables independientes en caso de ser necesario, para que haya consistencia en las unidades entre variables. En el caso de las variables por demora en paraderos que son subidas, bajadas y detenciones por bus, se necesita calcular el flujo de buses para normalizar este valor. La ecuación (4) muestra la fórmula que se emplea para calcular este valor. Además se tiene un valor de todas las subidas y bajadas que se tiene para cierto día-tramo-período, por lo que es posible calcular cuál es el promedio simplemente dividiéndolo por el flujo de buses, para saber el valor de subidas/bajadas promedio para cada observación. En el caso de las

detenciones, se asume que un bus se detiene en un paradero si es que hay actividad de pasajeros, es decir, si las subidas o bajadas son mayores a cero. Aplicando la misma lógica, es posible calcular las detenciones promedio por bus para cada una de las observaciones. Todas estas variables son normalizadas por el largo de cada uno de los tramos.

$$FlujoBuses_{edtps} = \frac{\sum_k distancia_k}{LargoTramo_t} \quad \forall k \in \{observaciones\}_{edtps} \quad (4)$$

La Tabla 5 muestra un resumen estadístico de las variables asociadas a la demora en paraderos. Resulta interesante la variabilidad entre los distintos valores para subida y bajadas. Destaca que los promedios van muy relacionados al número de servicios que ofrece cada eje, que tiene directa relación con el diseño del sistema pensando en un análisis de demanda de viajes. Por otra parte, destacan los valores máximos, en donde se tienen valores muy altos para el Eje Matta – Grecia, debido a la existencia de estaciones de Metro que transportan y concentran grandes demandas de pasajeros que realizan conexión intermodal

Tabla 5 : Descripción estadística de variables dependientes

Variable	Macul - Los Leones			Carmen - Las Industrias			Matta - Grecia		
	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max
Subida [pax/bus-km]	3.4	0.1	15.3	1.8	0.0	23.3	6.9	0.0	66.1
Bajadas [pax/bus-km]	3.4	0.1	15.7	2.6	0.0	24.0	5.8	0.0	71.4
Detenciones [det/bus-km]	1.8	0.4	4.2	1.2	0.0	5.8	1.7	0.2	5.4

Con respecto a las demoras por intersecciones, la variable a utilizar será el número de semáforos por kilómetro recorrido. Esta es una variable recurrentemente usada en la literatura. Para el tiempo de cruce se utilizan el número total de pistas, el flujo de buses en corredores (ya que se puede encontrar una relación directa entre flujo-velocidad) y se separan las observaciones por el tipo de prioridad que circulan los buses. Además, se incorporan variables mudas (dummies) de congestión, que explican en parte el nivel de tráfico y también la demora excedente en intersecciones para los tramos que exista la congestión. Estas últimas sólo existen fuera del corredor, en donde los niveles de flujo vehicular son muy altos, saturando tanto pistas de tráfico mixto y pistas sólo bus.

4. RESULTADOS

Se estimaron modelos de regresión lineal múltiple en dos etapas: primero se estimaron modelos para cada eje y luego se estimó un modelo general incluyendo las observaciones de todos los ejes. Se utilizaron las pruebas t-student y F de Fischer para corroborar la eficiencia y significancia de las variables.

El modelo final se muestran en la Tabla 6, donde se detallan los coeficientes ($\beta_{no-estandarizado}$) junto a su t-estadístico de cada variable independiente (x_i). Los modelos finales fueron obtenidos removiendo variables no significativas y variables con signo no esperado, además de agrupar variables que tenían coeficientes similares o que su agrupación mejoraba ya sea la

significancia o interpretación de la variable. El modelo presenta un valor F significativo estadísticamente.

Tabla 6: Modelo General

Estimadores (beta)	Unidades	Valor	t-estadístico
Intercepto	s/km	123.2	56.3
Medidas de prioridad			
Servicio Expreso	s/km	-7.4	-7.3
Pistas Totales (SB)	s/pista	-5.5	-11.8
Flujo de buses	s/km[bus/hr]	0.31	7
Corredor de Buses	s/km	-33.0	-18.9
Dummy fuera de punta			
Periodo (06:30 -07:00)	s/km	-21.3	-11.2
Demora en Paraderos			
Detenciones	s/det	11.6	18.3
Subidas	s/pax	2.2	16.8
Subidas(ZP)	s/pax	-0.7	-4.3
Bajadas	s/pax	0.9	9.2
Demora en intersecciones			
Semáforos [Carmen]	s/int	8.5	15.3
Semáforos [Matta - Grecia]	s/int	6.1	15.6
Semáforos [Macul]	s/int	9.9	17.2
Dummies de congestión			
Carmen Tramo 1 (07:00 - 09:00)	s/km	39.5	8.8
Carmen Tramo 1 (11:30 - 14:00)	s/km	31.2	6.6
Carmen Tramo 1 (15:30 - 17:00)	s/km	29.8	4.4
Carmen Tramo 1 (17:30 - 19:00)	s/km	15.2	3.8
Carmen Tramo 2 (12:30 - 14:00)	s/km	42.6	8
Carmen Tramo 2 (16:00 - 19:00)	s/km	29.2	8.3
Carmen Tramo 3 (17:00 - 19:30)	s/km	23	6.4
Macul Tramo 3 (07:30)	s/km	106.9	10.5
Macul Tramo 5 (07:00 - 09:30)	s/km	72.9	16
Macul Tramo 7 (07:00 - 09:30)	s/km	30.5	5
Macul Tramo 7 (07:30 - 08:30)	s/km	90.4	10.5
Grecia Tramo 8 (18:00 - 19:00)	s/km	57.1	12
Grecia Tramo 7 (17:00 - 20:00)	s/km	131.2	33.8
Grecia Tramo 9 (07:30 - 08:30)	s/km	82.7	10.2
Grecia Tramo 9 (08:00)	s/km	141.5	10.9
Grecia Tramo 9 (17:00 - 20:00)	s/km	71.7	12
Grecia Tramo 9 (18:00 - 19:00)	s/km	131.5	14.6
R2		0.76	
Error		0.104	
Observaciones		4138	

Los resultados muestran un intercepto que representa el tiempo de flujo libre en el tráfico mixto para buses. Este es de 123.2 s/km que corresponde a 29 km/h. Las variables de infraestructura de prioridad muestran que en el caso de existir pista sólo bus, el tiempo de recorrido disminuye con cada pista existente considerando tanto la pista sólo bus como el resto de pistas, lo que se debe a que los buses tienen mayor posibilidad de adelantar en caso de haber vehículos en su pista (por actividad de borde o virajes a la derecha) y porque los vehículos tienen mayores opciones en caso de querer adelantar, además de la pista sólo bus.

Con respecto a los corredores de buses aparece una variable dummy que, sumada al intercepto, fija el tiempo de recorrido a flujo libre en 93 s/km, equivalente a 38.7 km/h, y además se le debe agregar el flujo de buses que aumenta linealmente en 0.3 s/km por cada bus por hora. Esto implica que hay observaciones que aumentan en 1 s/km y en un máximo de 26.1 s/km si se calcula su impacto total, concluyendo que hay diferencias relevantes a definir en el flujo de buses en un corredor. Por otra parte, hay que recalcar que además de tener menores detenciones en promedio, el servicio expreso tiene una reducción significativa observable en tales observaciones, lo que está probablemente asociado a un ahorro de tiempo en la coordinación de semáforos y demora en intersecciones al detenerse menos en paraderos.

Con respecto a las demoras en intersecciones, hay que recalcar que hay una variable para cada eje, de modo que la demora promedio por intersección es diferente para cada uno. Los valores están en rangos razonables de demora por intersección y sus diferencias se deben principalmente a efectos propios de la semaforización. Al estar diseñado el sistema de semáforos en redes, algunos ejes estarán sujetos a diseños más favorables que otros, por un tema de la movilidad de las personas en particular y no sólo de los vehículos.

Las dummies de congestión varían en valores de 15[s/km] a 141[s/km] (ver Tabla 6), lo que indica una alta variabilidad en distintos puntos congestionados de los ejes. Esto es esperable, debido a que los niveles de tráfico varían según distintas condiciones, asociadas a la relevancia de actividades y conexión de los ejes. Además, estos cuellos de botella están generalmente asociados a intersecciones importantes, como es en el caso del Tramo 7 (Avenida Vicuña Mackenna) y Tramo 9 (Autopista Central) del eje Matta - Grecia. En su mayoría corresponden a los períodos puntas clásicos (mañana y tarde), a excepción de Carmen - Industrias en el Tramo 1 y 2, en donde aparecen dummies asociadas a la denominada “punta medio día”. Estos dos tramos están cerca del eje principal de Santiago (Alameda Bdo. O’ Higgins), lo que atrae vehículos en grandes cantidades durante todo el día.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo describe el tiempo de recorrido de buses mediante un modelo que evalúa el efecto de los distintos esquemas de prioridad que existen en la ciudad de Santiago. Usando datos disponibles de la operación del sistema (AVL y Smartcards), se aplicó una metodología basada en tramos para clasificar y analizar la información disponible. Esto permitió elaborar un modelo general del tiempo de recorrido de buses que además de evaluar las medidas de prioridad, fue capaz de captar los efectos de servicios expresos y zonas pagas (paraderos en donde subidas y bajadas se realizan por cualquier puerta y sin validar la subida). Basándose en la literatura para definir las variables y la consistencia de sus valores, fue posible obtener resultados bastante contundentes de los distintos factores que contribuyen a que un bus demore más(o menos) en realizar su recorrido.

En particular, las variables que aparecieron relevantes para reducir el tiempo de recorrido fueron:

- Corredor de buses.
- Pistas totales en caso de las pistas sólo bus.
- Período de la punta mañana (06:30 AM).

- Subidas en zonas pagas.

Las variables que aparecieron relevantes para aumentar el tiempo de recorrido fueron:

- Intersecciones semaforizadas
- Actividad en paraderos
- Efectos de sobrecongestión fuera del corredor.
- Flujo total de buses en el corredor.

Es necesario recalcar que tres ejes con características distintas (largo, tipo de prioridad, volúmenes de buses y demanda) fueron analizados y en conjunto modelados. El modelo fue capaz de captar características en común en todos los ejes y obtener resultados que concuerdan con lo visto en la literatura. La reducción del tiempo de recorrido en corredores es clara (Gibson et al., 2015), en pistas sólo bus se encontró una reducción significativa como evidenciaron (Diab and El-Geneidy, 2012) y las variables tradicionales como intersecciones semaforizadas y demanda en paraderos.

Dado que la información está disponible para todos los servicios de buses de la ciudad, se puede aplicar esta metodología para contrastar nuevos tipos de infraestructura con las ya existentes. Además, los resultados de este trabajo sirven para proyectar los tiempos de viaje en caso de querer hacer modificaciones en algún tramo y cuantificar directamente su impacto en el tiempo de recorrido de los buses.

Una recomendación sería el cambiar todos los paraderos a sistemas de zonas pagas, pero dado que esto tiene un costo de implementación y operación alto, es necesario detectar qué lugares tienen alta demanda e implementarlas en esos casos. Es necesario precisar hacia dónde se mueve la demanda para que los pasajeros perciban el efecto de ahorro de tiempo en el total de su viaje. Por ejemplo, si el grueso de esas subidas se sube en el Tramo 2 de Matta – Grecia y luego van más allá del Tramo 7 del mismo eje, entonces en la punta tarde estarán afectados por la sobre congestión de ese tramo (mayor a 130 s/km), lo que hace que las medidas del corredor pierdan eficiencia por un mal manejo de la congestión en ese punto.

Con respecto a líneas futuras de investigación, es posible mencionar la falta de una modelación más explícita de la demora en intersecciones, identificando las redes de semáforos, detectando los niveles de coordinación y además el diseño de fases de estos mismo. Esto ciertamente incide en el tiempo de recorrido (Gibson et al., 2015) y agregar este tipo de variables a la modelación resultaría favorable a una mejor comprensión de la variable estudiada. Las dummies de demora excedente por sobre congestión podrían modelarse de manera más explícita si es que se tuviese algún tipo de información de tráfico en los tramos sin corredor. Al tener variables explícitas de estos, el modelo sería mucho más eficiente para reproducir valores en distintas situaciones, ya que en este trabajo las dummies son específicas a esos tramos.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo de investigación presentado está parcialmente financiado por Fondecyt (1161589), FONDEF D10E1002 y el Instituto de Sistemas Complejos de Ingeniería, Chile (CONICYT FB0816)

REFERENCIAS

- Abkowitz, Mark D, and Israel Engelstein. (1983). "Factors affecting running time on transit routes." **Transportation Research Part A: General** 17(2): 107-113.
- Cortés, Cristian E, Jaime Gibson, Antonio Gschwender, Marcela Munizaga, and Mauricio Zúñiga. (2011). "Commercial bus speed diagnosis based on GPS-monitored data." **Transportation Research Part C: Emerging Technologies** 19(4): 695-707.
- Diab, Ehab I, and Ahmed M El-Geneidy. (2012). "Understanding the impacts of a combination of service improvement strategies on bus running time and passenger's perception." **Transportation Research Part A: Policy and Practice** 46(3): 614-625.
- Feng, Wei, Miguel Figliozzi, and Robert L Bertini. (2015). "Quantifying the joint impacts of stop locations, signalized intersections, and traffic conditions on bus travel time." **Public Transport**: 1-18.
- Gibson, Jaime, Marcela Munizaga, Camila Schneider, and Alejandro Tirachini. 2015. "Median Busways versus Mixed-Traffic: Estimation of Bus Travel Time under Different Priority Conditions with Explicit Modelling of Delay at Traffic Signals." in **Transportation Research Board 94th Annual Meeting**.
- Kimpel, Thomas J, James Strathman, Robert L Bertini, and Steve Callas Trimet. (2005). "Analysis of Transit Signal Priority Using Archived TriMet Bus Dispatch System Data Final Report."
- Ma, Zhen-Liang, Luis Ferreira, Mahmoud Mesbah, and Ahmad Tavassoli Hojati. 2015. "Modelling Bus Travel Time Reliability Using Supply and Demand Data from Automatic Vehicle Location and Smart Card Systems." in **Transportation Research Board 94th Annual Meeting**.
- Munizaga, Marcela A, and Carolina Palma. (2012). "Estimation of a disaggregate multimodal public transport Origin–Destination matrix from passive smartcard data from Santiago, Chile." **Transportation Research Part C: Emerging Technologies** 24: 9-18.
- Slavin, Courtney, Wei Feng, Miguel Figliozzi, and Peter Koonce. (2013). "Statistical Study of the Impact of Adaptive Traffic Signal Control on Traffic and Transit Performance." **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board** (2356): 117-126.
- Strathman, James G, Kenneth Dueker, Thomas J Kimpel, Rick Gerhart, Ken Turner, Pete Turner, Steve Callas, and David Griffin. (1999). "Service reliability impacts of computer-aided dispatching and automatic vehicle location technology: A Tri-Met case study."
- Strathman, James G, Thomas J Kimpel, Kenneth J Dueker, Richard L Gerhart, and Steve Callas. (2002). "Evaluation of transit operations: Data applications of Tri-Met's automated bus dispatching system." **Transportation** 29(3): 321-345.
- Surprenant-Legault, Julien, and Ahmed El-Geneidy. (2011). "Introduction of reserved bus lane: Impact on bus running time and on-time performance." **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board** (2218): 10-18.

- Tirachini, Alejandro. (2013). "Estimation of travel time and the benefits of upgrading the fare payment technology in urban bus services." **Transportation Research Part C: Emerging Technologies** 30: 239-256.
- Zhang, Ledian, Jiancheng Weng, and Zhihong Chen. 2014. "Characteristic Analysis of Bus Travel Speed on Commuting Corridors Based on GPS Data" In **CICTP 2014: Safe, Smart, and Sustainable Multimodal Transportation Systems**.