

MODELOS PARA ESTIMAR LA VELOCIDAD COMERCIAL DEL TRANSPORTE PUBLICO EN SANTIAGO DE CHILE

Rodrigo Fernández A., Eduardo Valenzuela F.
Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Chile
Casilla 228-3, Santiago.
Fono/Fax: 689 4206
e-mail: rodferna@ing.uchile.cl, evalenza@ing.uchile.cl

RESUMEN

Este artículo define, en primer lugar, la velocidad comercial del transporte público y su uso potencial en distintos modelos de transporte y emisiones. Luego, basado en estudios previos, se propone un modelo exponencial negativo para estimar la velocidad comercial de los buses en función de ciertas variables de circulación. El modelo consiste en relacionar la caída en la velocidad comercial con la frecuencia y duración de las detenciones (por cualquier causa) que realizan los buses en su trayectoria. El modelo fue calibrado a partir de datos globales en rutas características en la ciudad de Santiago de Chile, obtenidos mediante vehículos instrumentados. La calibración entregó buenos ajustes, en los cuales es posible distinguir velocidades por período, sentido de circulación y tecnologías de vehículos. Adicionalmente, se incluye un método para extender el modelo propuesto y estimar sus variables explicativas mediante datos provenientes de estudios estratégicos llevados a cabo en Santiago de Chile (ESTRAUS y Estudio de Demanda del Transporte Público de Superficie). Todo lo anterior, permitirá estimar con mayor exactitud los efectos de decisiones sobre el transporte público de superficie.

1. INTRODUCCION

La velocidad comercial de un vehículo de transporte público en un tramo corresponde a la velocidad media de viaje entre un paradero origen y otro destino, incluyendo todas las detenciones intermedias. Al igual que la velocidad de operación del transporte privado, la velocidad comercial del transporte público se puede utilizar para distintos objetivos:

- Evaluar el nivel de servicio y costos de viaje de los servicios en modelos de planificación de transporte.
- Estimar las emisiones y consumo de combustible en modelos ambientales.
- Diagnosticar y evaluar esquemas de prioridad en modelos de tráfico.
- Comparar tecnologías para la toma de decisiones de política de transporte.

En este artículo se analiza y propone un modelo para predecir la velocidad comercial de buses a partir de variables agregadas para los objetivos anteriores. La intención es tener un modelo que prediga la velocidad promedio del transporte público ante distintos escenarios, más allá de valores globales como los mostrados en la Tabla 1 (Martins, 1998).

Tabla 1
Características Operacionales del Transporte Público

Sistema y Grado de Segregación	Espaciamiento de Paraderos (m)	Velocidad Comercial (km/h)	Capacidad Vial (veh/h-sentido)	Capacidad de Transporte (pax/h-sentido)
Bus Calle Normal ⁽¹⁾	200	10-20	60-120	5.000-8.000
Bus Pista Sólo Bus ⁽²⁾	400	15-20	90-120	7.500-10.000
Bus Articulado Calle Normal	400	10-20	60-120	8.500-13.500
Bus Articulado Vía Segregada ⁽³⁾	400	15-20	90-120	12.500-17.000
Tranvía Calle Normal	400	10-20	60	10.000-15.000
Tranvía Vía Segregada	400-600	18-25	60	15.000-21.000
Metro Ligero Calle Normal	400-600	18-25	60	15.000-21.000
Metro Ligero Vía Segregada	600-800	25-30	40	20.000-28.000
Metro Pesado Vía Segregada	800-1.200	30-35	40	40.000-60.000

Fuente: adaptado de Martins (1998)

(1) Pistas compartidas por transporte público y resto del tráfico.

(2) Pistas destinadas al uso exclusivo del transporte público, demarcadas y/o pigmentadas en el pavimento.

(3) Pistas destinadas al uso exclusivo del transporte público, físicamente separadas del resto del tráfico.

Los valores de la Tabla 1 provienen de experiencias internacionales. En ciertos casos, se observa distinta *capacidad de transporte*¹ para igual *capacidad vial*². Bajo ciertas condiciones – v.g., vía segregada – el vehículo puede ser más largo; se obtiene, en consecuencia, mayor capacidad de transporte. Se debe recordar al lector que la capacidad vial de sistemas de transporte público la define la capacidad de sus estaciones, no la segregación del resto del tráfico.

También se observa una cierta correlación entre la frecuencia de detenciones en paraderos (espaciamiento entre paraderos) y la velocidad comercial. Así, de varias experiencias (Cohen, 1984; Gibson et al, 1989) se ha llegado a establecer que la velocidad comercial se relaciona más con la frecuencia y duración de las detenciones por cualquier causa, antes que con otras variables. Esto quiere decir que se pueden alcanzar velocidades comerciales comparables a la de un sistema de metro (30 a 32 km/h) con esquemas de prioridad a buses (Gibson et al, 1989). En efecto, si los buses operaran en una vía segregada, con paraderos distanciados 500 m, pero deteniéndose 2 veces en promedio en cada uno, se tendría una velocidad comercial de 20 km/h (Figura 1). Con una única y eficiente detención en paraderos, se alcanzaría una velocidad comercial de 25 km/h. Bajo las mismas condiciones, con prioridad en los semáforos, se lograría una velocidad comercial promedio superior a los 28 km/h. Y, si la frecuencia de detenciones fuese igual a la del Metro (1.0 a 1.3 det/km), la velocidad comercial podría subir a 31 km/h (Fernández, 1996 y 1999).

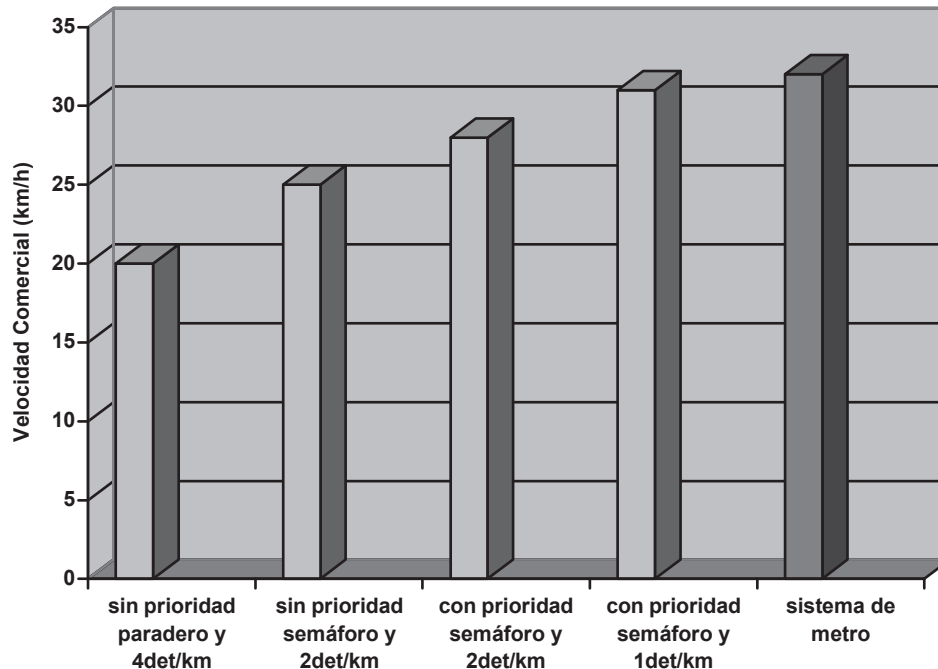


Figura. 1: Velocidad Comercial en Vía Segregada

Como la velocidad comercial tiene que ver con el tiempo total de viaje en un tramo de ruta, este tiempo se puede descomponer de la siguiente forma:

¹ Máximo número de *pasajeros* por unidad de tiempo y sentido que pueden circular por una vía.

² Máximo número de *vehículos* por unidad de tiempo y sentido que pueden circular por una vía.

- en movimiento: que depende de la velocidad de recorrido de los vehículos entre detenciones;
- en intersecciones: que depende del número de intersecciones y la demora en cada una; y
- en paraderos: que depende del número de paraderos y de la demora en cada uno.

Por lo tanto, para encontrar una velocidad promedio de los vehículos de transporte público se debe estudiar el efecto de todas y cada una de estas componentes sobre el tiempo total de viaje.

2. MODELOS DE VELOCIDAD COMERCIAL

Una revisión de los distintos modelos de velocidad comercial se puede encontrar en Fernández & Valenzuela (2003). Sin embargo, la relación básica entre la velocidad comercial de los buses y las detenciones se puede describir mediante la Ecuación 1 (Gibson et al, 1989).

$$V_c = V_0 e^{-\alpha f_d} \quad (1)$$

donde

V_c : velocidad comercial de los buses (km/h)

f_d : frecuencia de detenciones de los buses por cualquier causa (det/km)

V_0, α : parámetros de calibración.

La interpretación de los parámetros es la siguiente: V_0 representa la velocidad en movimiento de los buses entre detenciones y α es la influencia marginal de cada detención sobre la velocidad comercial.

Algunos valores encontrados para los parámetros de la Ecuación (1) en distintas realidades – Francia (país desarrollado) y Chile (país en vías de desarrollo) – se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2
Valores de Parámetros para Estimar Velocidad Comercial

Escenario	V_0	α
Pista sólo bus (Francia)	32 km/h	0,122
Calle normal (Santiago)	35 km/h	0,144
Vía segregada (Santiago)	36 km/h	0,140

Fuente: Fernández & Valenzuela (2003)

Estudios posteriores (Valenzuela y Baeza, 1991; Fernández, 1996) han propuesto relaciones más complejas. La Ecuación 2 es un ejemplo de este tipo de especificaciones (Valenzuela y Baeza, 1991).

$$V_c = V_0 e^{-(\alpha f_d + \beta t_d)} \quad (2)$$

donde

t_d : tiempo que dura cada detención (s/det)

β : efecto marginal del tiempo detenido

Los otros parámetros tienen la misma interpretación anterior.

Utilizando esta formulación y una base de datos generada a partir de vehículos instrumentados circulando por rutas típicas de la ciudad de Santiago de Chile, se calibró el modelo mostrado en la Ecuación (3). Los recorridos incluyeron mayoritariamente avenidas con pistas sólo bus y vías segregadas para buses, además de algunos tramos de calles normales sin facilidades explícitas para los buses. Los valores de los parámetros calibrados se muestran en la Tabla 3.

$$V_c = (V_0 + V_0' \delta_S + V_0'' \delta_P) e^{-[(\alpha + \alpha' \delta_{fd}) f_d + (\beta + \beta' \delta_{td}) t_d]} \tag{3}$$

donde

- V_c : velocidad comercial del transporte público (km/h)
- f_d : frecuencia de detenciones por kilómetro (det/km)
- t_d : tiempo detenido por detención (s/det)
- δ_S : variable muda activa para sentido oriente - poniente
- δ_P : variable muda activa para período punta mañana (7:00 a 9:00)
- δ_{fd}, δ_{td} : variables mudas activas para vehículos con caja de cambios automática
- V_0, α, β : parámetros a calibrar

Tabla 3
Parámetros del Modelo de Velocidad Comercial

Parámetro	Valor	t – estadístico
V_0	29,57 km/h	25,60
V_0'	2,22 km/h	2,21
V_0''	2,16 km/h	2,00
α	0,041	10,68
β	0,027	6,98
α'	0,023	4,40
β'	-0,013	3,13
r^2	0,55	–

Fuente: elaboración propia

Los parámetros obtenidos son adecuados, tanto en signo como en significancia estadística. El indicador de ajuste global r^2 se encuentra en el borde inferior a los normalmente obtenidos en este tipo de modelos. De los resultados se puede observar que, a escala agregada, la velocidad en movimiento de los buses se aproxima a los 30 km/h. Este valor es menor al obtenido en estudios previos, pero se encuentra dentro del rango esperado, y puede ser explicado por el cambio de tecnologías de vehículos que ha tenido la flota de buses de Santiago en los últimos 10 años: desde vehículos de menor capacidad y tamaño (8 a 10 m) a buses estándar de 12 m de largo.

Además, se puede decir que el efecto marginal del solo evento de detenerse es un 50% mayor que el correspondiente al tiempo detenido. Por ello, es importante minimizar no sólo la duración de las detenciones, sino que también su ocurrencia. En particular, por su incidencia en las emisiones debido a ciclos de frenado y aceleración. Indudablemente, aquí tiene una influencia importante el comportamiento en intersecciones y, sobre todo, en paraderos de buses.

3. EXTENSION DEL MODELO

La Ecuación (3) calibrada puede considerarse de mayor validez para el caso vías en las cuales se produce algún tipo de segregación entre buses y el resto del tráfico: segregación física (corredores segregados o vías parcialmente segregadas), segregación virtual (pistas sólo bus) o prioridad *de facto*, ya que la mayor parte de las observaciones abarca estas condiciones.

Para corroborar esta hipótesis, en el mes de abril del 2002 se realizaron nuevas observaciones, esta vez de manera manual con observadores sobre los vehículos. La unión de la base de datos con buses instrumentados más esta nueva base sumó más de 1.600 observaciones de velocidad comercial en todo tipo de calles: sin prioridad explícita, pistas sólo bus, vías segregadas y vías exclusivas en Santiago; en períodos punta y fuera de punta, así como en dirección poniente – oriente y norte – sur y viceversa. El mejor modelo encontrado para todas las observaciones se puede resumir en el siguiente:

$$V_c = (V_0 + V_0^{NS} \delta_{NS} + V_0^{PO} \delta_{PO}) e^{-(\alpha_s f_s + \alpha_p f_p + \beta_s t_s + \beta_p t_p)} \quad (4)$$

donde

- V_c : velocidad comercial del transporte público (km/h)
- f_s : frecuencia de detenciones en semáforos y congestión (det/km)
- t_s : tiempo detenido en semáforos y congestión (s/det)
- f_p : frecuencia de detenciones en paraderos (det/km)
- t_p : tiempo detenido en paraderos (s/det)
- δ_{NS} : variable muda activa para sentido norte - sur
- δ_{PO} : variable muda activa para sentido poniente - oriente
- $V_0^{ij}, \alpha_k, \beta_k$: parámetros a calibrar

Esta nueva especificación para obtener la velocidad media del transporte público de superficie es de validez general y tiene mejor capacidad explicativa y sustento conceptual que la actual provista en el modelo ESTRAUS en donde se liga la velocidad del transporte público mediante un factor a la velocidad de los vehículos particulares (DIM, 2000).

Los valores de los parámetros calibrados se muestran en la Tabla 4. Al contrario del modelo (3), esta especificación resultó más robusta ($r^2 = 0,7$), con velocidades en movimiento (V_0) mayores, producto que ahora se recoge el efecto de calles exclusivas (Avenidas Recoleta y Vicuña Mackenna, Eje San Diego – Bandera y Eje Teatinos – Nataniel). Los efectos que la hacen disminuir son el sentido de circulación (V_0^{PO} , V_0^{NS}), lo que se podría explicar producto de la congestión en dirección al sur y producto de las pendientes en dirección hacia el oriente.

Para vías no segregadas podría introducirse una variable muda δ_S al termino relacionado con una variación en la velocidad en movimiento en vía segregada V_0^S . No obstante, la variable resultó no significativa. Esto no es de extrañar, ya que investigaciones previas han mostrado que el impacto de la segregación sobre la velocidad en movimiento en vías con altos flujos de buses (más de 100 buses por hora) es menor, debido al fenómeno denominado prioridad *de facto* descrito por Gibson et al (1989). Este consiste en que los buses se toman una o dos pistas para su uso exclusivo, sin necesidad de segregación explícita, lo que se ve reforzado por la actitud del resto del tráfico de evitar mezclarse con los buses ante la posibilidad de demoras en esas pistas.

Tabla 4
Parámetros del Modelo General de Velocidad Comercial

Parámetro	Valor	t – estadístico
V_0	50,02 km/h	17,90
V_0^{NS}	-3,87 km/h	2,19
V_0^{PO}	-7,15 km/h	2,41
α_s	-0,064	8,33
α_p	-0,108	7,65
β_s	-0,009	7,11
β_p	-0,007	3,79
r^2	0,70	-

Fuente: elaboración propia

Tampoco resultaron significativas en este caso variables mudas relacionadas con la tecnología de la caja de cambios.

La frecuencia de detenciones, por su parte, se separó por causa – semáforos o congestión (f_s y t_s) y paraderos (f_p y t_p) – a partir de información del número de intersecciones semaforizadas y del número de paraderos del tramo. Se postula que este tipo de información puede ser obtenido de las bases de datos de estudios como MTT (1997) o del modelo ESTRAUS (MIDEPLAN, 2001).

El tiempo detenido en paraderos (t_p) puede especificarse mediante relación con tasas de subidas y bajadas por bus. El modelo clásico para esto es (Gibson et al, 1989):

$$t_p = \beta_0 + \max_i \{ \beta_1 p_{si} + \beta_2 p_{bi} \} \tag{5}$$

donde

- t_p : tiempo detenido en un paradero (s)
- β_0 : tiempo perdido en un paradero (s): abrir/cerrar puertas, caminar hacia el bus, etc.
- β_1 : tiempo marginal de subida por pasajero (s/pax)
- β_2 : tiempo marginal de bajada por pasajero (s/pax)
- p_{si} : número de pasajeros que sube por la puerta i (pax)
- p_{bi} : número de pasajeros que baja por la puerta i (pax)

Sin embargo, asumiendo que sólo se dispone de información agregada por arco ESTRAUS, la Ecuación (5) podría reducirse a la forma siguiente.

$$t_p^a = \beta_0^a + \beta_{12}^a p_{sb}^a \tag{6}$$

donde

- t_p^a : tiempo detenido en paraderos en el arco (s/km)
- p_{sb}^a : total de pasajeros que sube y baja en un arco (pax/km)
- β_0^a : tiempo perdido por transferencias de pasajeros (s/km)
- β_{12}^a : tiempo marginal de transferencia (subida y bajada) de pasajeros (s/pax)

Un modelo de estas características fue calibrado con la base de datos agregada encontrándose los resultados mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5
Parámetros del Modelo de Tiempo Detenido en Paraderos

Parámetro	Valor	t – estadístico
β_0^a	55,6	6,28
β_{12}^a	17,0	15,30
r^2	0,50	-

Fuente: elaboración propia

Así, conociendo la longitud del arco ESTRAUS y p_{sb}^a sería posible obtener la demora por transferencia de pasajeros. Se postula que el modelo ESTRAUS podría entregar la información contenida en sus bases de datos para obtener estas variables. Por ejemplo, la demanda de subida y bajada de pasajeros en cada zona se puede obtener de las matrices O/D de transporte público.

Por su parte, el tiempo detenido por semáforos se puede obtener de la base de datos agregada como valor promedio. Así, para 227 observaciones se encontró un valor promedio actual de 114 segundos por kilómetro, con una alta desviación estándar (244 s/km). En un nuevo escenario, se podría calcular a partir del número de semáforos en el arco y de la demora producto de la programación de los semáforos, de la manera tradicional (Akçelik, 1981); por simplicidad, no se muestra el término por efectos aleatorios y sobresaturación, el que puede ser incorporado si el analista lo desea. Así, la demora media uniforme por bus (s) sería:

$$t_s = \frac{C(1-u)^2}{2(1-y)} \quad (7)$$

donde:

$u = \frac{v_e}{C}$: razón de verde efectivo del semáforo

$y = \frac{q_b}{S}$: factor de carga de la pista de buses

v_e : verde efectivo para los buses (s)

C : tiempo de ciclo del semáforo (s)

q_b : flujo de buses en el arco (bus/h)

S : flujo de saturación de la pista de buses (bus/h)

No obstante, la Ecuación (4) indica que el efecto marginal de la frecuencia de detenciones es un orden de magnitud superior a la de los tiempos detenidos, ratificando que es la frecuencia de detenciones el efecto más importante sobre la velocidad comercial del transporte público. Y, en ésta, la frecuencia de detenciones en paraderos es un 70% más importante que la frecuencia de detenciones por semáforos o congestión. En consecuencia, la atención debe ponerse sobre la frecuencia de detenciones en paraderos.

En la situación actual, se ha calculado que la frecuencia promedio de detenciones por semáforos o congestión es igual a $8,0 \pm 7,6$ det/km y que la frecuencia de detenciones en paraderos es de $5,4 \pm 4,1$ det/km.

En un escenario hipotético, la frecuencia de detenciones por paraderos resultará del número de paraderos que se establezca en el arco. La frecuencia de detenciones por semáforos dependerá del número de semáforos en el arco multiplicado por el número medio de detenciones por bus (h), la que se puede obtener de la manera tradicional; como en el caso anterior, se excluye el término por efectos aleatorios y sobresaturación.

$$h = \frac{1-u}{1-y} \quad (8)$$

Por lo tanto, con las extensiones propuestas, se podría evaluar escenarios en los que cambie la demanda de pasajeros en un subconjunto de arcos, el flujo de buses en esos arcos y el número de paraderos en los mismos arcos, a partir de la nueva especificación para estimar la velocidad comercial de los buses mediante la Ecuación (4).

4. DISCUSION

Este artículo ha mostrado que, para estimar la velocidad promedio del transporte público, un modelo que la ligue con las actividades propias de estos vehículos (detenciones y demoras en paraderos e intersecciones) es más apropiado que relacionarla con la velocidad del resto del tráfico en el mismo sentido. Obviamente, una expresión como la propuesta en este trabajo dista de una curva flujo-velocidad tradicional a la hora de representar la cinemática de un vehículo de transporte público.

Lo anterior ha sido corroborado por DIM (2000). Allí se observa que el coeficiente r^2 entre velocidades de buses medidas en terreno con las estimadas por el modelo ESTRAUS, calculadas estas últimas como un factor constante de la velocidad de los autos que circulan en el mismo sentido, no supera el valor 0,16, con un promedio de 0,07. La velocidad de los autos había sido obtenida de curvas flujo-velocidad tradicionales.

En consecuencia, siendo la velocidad promedio de los vehículos la principal variable para la toma de decisiones, los resultados mostrados en este trabajo permitirán estimar con mayor exactitud los efectos de distintos escenarios respecto del transporte público de superficie. En especial en aquellos casos en los que se pretende implementar corredores exclusivos de alta capacidad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parte de un estudio mayor (MODEM) financiado por SECTRA y liderado por el Dr. Mauricio Osses del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile. Los autores agradecen al Dr. Osses por proveer sus datos y útiles comentarios para este trabajo.

REFERENCIAS

Akçelik, R. (1981) **Traffic signals – capacity and timing analysis**. Australian Road Research Board Ltd. Research Report 123, Fifth Reprint, 1993.

Cohen, S. (1984) Indicateurs d'allure et de consommation d'un autobs en exploitation. **Recherche Transport Sécurité**, Janvier, 16-22.

DIM (2000) **Estudio de Análisis de Evaluaciones y Reevaluaciones Ex-Post, VI Etapa**. Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago.

Fernández, R. and Valenzuela, E. (2003) A model to predict bus commercial speed. **Traffic Engineering and Control**. Vol. 44(2), 67-71.

Fernández, R. (1999) Medidas de prioridad al transporte público. **Actas del IX Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**, 419-429, Santiago.

Fernández, R. (1996) **Análisis Ex-post de la Operación de la Vía Exclusiva para Buses de Avenida Grecia**. Informe Final Comisión de Planificación de Inversiones en Infraestructura de Transporte, Secretaría Ejecutiva, Santiago.

Gibson, J., Baeza, I. and Willumsen, L.G. (1989) Bus stops, congestion and congested bus stops. **Traffic Engineering and Control**. Vol. 30(6), 291-196.

Martins, A.F. (1998) Oferta de transportes. Capacidades e nivel de serviço nos sistemas. **Revista dos Transportes Públicos**. Vol. 79(2), 35-48. ANTP, São Paulo.

MIDEPLAN (2001) **Manual de operación del modelo ESTR AUS, versión 2.04**. Ministerio de Planificación y Cooperación, Santiago.

MTT (1997) **Estudio de Demanda del Sistema de Transporte Público de Superficie de Santiago**. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Secretaría Regional Ministerial de la región Metropolitana.

Valenzuela, E. y Baeza, I. (1991) Influencia del diseño de bus, paradero y modalidad de operación sobre la duración de las detenciones de buses. **Actas del V Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**, 453-468, Santiago.