

# **SEIS PASAJEROS POR METRO CUADRADO: EFECTOS DEL HACINAMIENTO EN LA OFERTA DE TRANSPORTE PÚBLICO, EL BIENESTAR DE LOS USUARIOS Y LA ESTIMACIÓN DE DEMANDA**

Alejandro Tirachini, Universidad de Chile, [alejandro.tirachini@ing.uchile.cl](mailto:alejandro.tirachini@ing.uchile.cl)  
David A. Hensher, University of Sydney, [david.hensher@sydney.edu.au](mailto:david.hensher@sydney.edu.au)  
John M. Rose, University of Sydney, [john.rose@sydney.edu.au](mailto:john.rose@sydney.edu.au)

## **RESUMEN**

El presente artículo examina las múltiples dimensiones que el hacinamiento de pasajeros tiene en la demanda, la oferta y las operaciones de transporte público, incluyendo efectos en la velocidad de circulación, tiempo de espera, confiabilidad de los tiempos de viaje, el bienestar de los pasajeros, el valor de los tiempos de espera y en vehículo, la elección de bus y ruta, y los niveles óptimos de frecuencia, tamaño vehicular y tarifa. La desutilidad del hacinamiento en trenes y buses es estimada en Sydney, Australia, con el objetivo de mostrar el impacto que tiene el hacinamiento en el valor estimado del tiempo en vehículo y en las estimaciones de demanda. Con un modelo logit multinomial, se muestra numérica y analíticamente que si la demanda de un servicio de transporte público se estima sin considerar al hacinamiento como fuente de desutilidad, la demanda será sobreestimada si el servicio se diseña para tener un número de pasajeros parados por sobre un umbral.

*Palabras clave: hacinamiento, tiempo de viaje, tiempo de espera, valor del tiempo, estimación de demanda*

## **ABSTRACT**

This paper examines the multiple dimensions of passenger crowding on public transport demand, supply and operations, including effects on operating speed, waiting time, travel time reliability, passengers' wellbeing, valuation of waiting and in-vehicle time savings, route and bus choice, and optimal levels of frequency, vehicle size and fare. Secondly, crowding externalities are estimated for rail and bus services in Sydney, in order to show the impact of crowding on the estimated value of in-vehicle time savings and demand prediction. Using a Multinomial Logit Model, we show both numerically and analytically that if demand for a public transport service is estimated without explicit consideration of crowding as a source of disutility for passengers, demand will be overestimated if the service is designed to have a number of standees beyond a threshold.

*Keywords: crowding, travel time, waiting time, value of travel time savings, demand estimation*

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Contexto

Nuestro entendimiento del problema de elección modal en transporte ha mejorado substancialmente en los últimos 40 años, y con ellos hemos acumulado evidencia que muestra sin ambigüedades que, más allá del tiempo de viaje y del costo, los usuarios toman en cuenta una serie de aspectos cualitativos que influyen en la experiencia de viajar, tales como los niveles de ocupación de vehículos y estaciones y la comodidad en los viajes en transporte público, la regularidad del servicio y la predictibilidad de los tiempos de viaje, entre otros. La importancia de estos aspectos debería crecer en el corto y mediano plazo en países como Chile, ya que a medida que la población se enriquece es esperable que se otorgue mayor valor a la calidad de servicio y la comodidad del viaje, relativo a reducciones de tiempo solamente.

Una de las variables más influyentes en la calidad de servicio es el nivel de ocupación de vehículos y estaciones, en particular cuando muchas personas se ven forzadas a compartir un espacio limitado, caso en el cual se produce hacinamiento, característica común de muchos sistemas de transporte público en Chile, al menos en las horas punta. En Santiago, los niveles de hacinamiento alcanzados en metro y buses son una fuente de recurrente de incomodidad para los usuarios, al punto que la incomodidad por hacinamiento fue el atributo peor evaluado por los usuarios en una encuesta sobre Transantiago (Yáñez *et al.*, 2010), y el tema ha aparecido varias veces en reportajes de televisión y prensa escrita. Luego, resulta particularmente relevante en el contexto chileno estudiar los múltiples efectos del hacinamiento en las operaciones y en los usuarios de sistemas de transporte público.

### 1.2 Medidas del nivel de hacinamiento

El concepto de hacinamiento se relaciona a una alta densidad de personas en vehículos, estaciones, paraderos y accesos. Varias medidas han sido planteadas para cuantificar el hacinamiento. En el caso de vehículos, la más común es considerar el factor de ocupación, definido como el cociente entre el número de pasajeros y el número de asientos (Whelan y Crockett, 2009). Otros autores usan la capacidad nominal (que incluye pasajeros sentados y parados) para medir el factor de ocupación (Oldfield y Bly, 1988; Jara-Díaz y Gschwender, 2003); usando esta última definición se puede sugerir, por ejemplo, que cuando el factor de ocupación es sobre 80% un vehículo se puede considerar hacinado. El problema es que ninguna de las definiciones basada en factor de ocupación provee una indicación clara de cuál es el grado de hacinamiento que sufren los usuarios, el que se desprende de mejor forma de la densidad de pasajeros parados por metro cuadrado (Wardman y Whelan, 2011). Así, una densidad de 5 ó 6 pasajeros por metro cuadrado es un indicador muy probable de hacinamiento, independiente de la capacidad de los vehículos.

### 1.3 Organización del artículo

El artículo se organiza de la siguiente forma. En la Sección 2 se analiza y clasifica la literatura que estudia alguno de los múltiples efectos que tiene el hacinamiento de pasajeros en las operaciones de transporte público, el bienestar de los pasajeros y las estimaciones de demanda, incluyendo impactos en tiempos de espera y en vehículo, el valor de reducir tiempo de viaje y la oferta óptima de transporte público. Los estudios precedentes no han analizado la influencia de ignorar la existencia de las externalidades de hacinamiento en el valor de ahorrar tiempo de viaje y en la estimación de demanda, lo que se presenta en las Secciones 3 y 4. Finalmente, las conclusiones principales de este estudio se presentan en la Sección 5.

## **2 EFECTOS DEL HACINAMIENTO DE PASAJEROS EN EL TRANSPORTE PÚBLICO**

### **2.1 Efecto en el tiempo en vehículo**

El efecto del hacinamiento en aumentar los tiempos de subida y bajada de pasajeros ha sido capturado por varios autores que han estimado el tiempo de detención de buses y trenes en estaciones de transferencia y paraderos. Lin y Wilson (1992) encontraron que la fricción entre pasajeros que se bajan, suben y aquellos que se mantienen parados al interior de un vehículo o en la estación es significativa en aumentar los tiempos de detención de trenes livianos en Massachusetts. En el caso de buses, el aumento de los tiempos de subida y bajada debido a altos niveles de hacinamiento ha sido estimado con datos de varias ciudades alrededor del mundo, como Santiago (Gibson *et al.*, 1997), Chicago (Milkovits, 2008), Dhaka (Katz y Garrow, 2012), Vancouver (Fletcher y El-Geneidy, 2013) y Sydney (Tirachini, 2013). Por ejemplo, Fletcher y El-Geneidy (2013) encontraron que el efecto hacinamiento aparece una vez que el 60% de la capacidad de los vehículos ha sido ocupada. Por otro lado, Fernández (2011) muestra, mediante experimentos de laboratorio con un modelo de bus de Transantiago a escala real, que el tiempo promedio de subida se incrementa linealmente con la densidad de pasajeros ( $\text{pax}/\text{m}^2$ ) mientras que el tiempo de bajada por pasajero crece exponencialmente, triplicándose cuando la densidad de pasajeros a bordo es  $6 \text{ pax}/\text{m}^2$ , lo que se explica por la dificultad de bajarse de un vehículo con tal nivel de ocupación. Katz y Garrow (2012) encuentran que el diseño de vehículos (e.j., espacio libre de asientos al frente, posición de puertas, sistema de pago de tarifa) influencia el número de personas que tiene que pararse cerca de puertas, lo que finalmente afecta los tiempos de subida y bajada y el tiempo total de detención de los buses. Por ejemplo, en buses con dos puertas, cuando la segunda puerta está al medio del bus, más personas se paran cerca de ella y el efecto del hacinamiento es más fuerte que cuando tal puerta está en la parte trasera.

La capacidad limitada de estaciones y paraderos también puede ser un problema cuando un número alto de personas transita o espera al mismo tiempo. Por ejemplo, a algunos pasajeros les toma más tiempo llegar a la puerta de su bus si hay muchas personas paradas en la estación o paradero, obstruyendo parcialmente el paso o la visión cuando es necesario señalar para hacer parar a un vehículo (TRB, 2003; Jaiswal *et al.*, 2007; 2010). En particular, Gibson *et al.* (1997) en Santiago y Jaiswal *et al.* (2010) en Brisbane han encontrado que el tiempo de subida por pasajero puede depender del nivel de hacinamiento en el área de espera de una parada de buses.

### **2.2 Efecto en el tiempo de espera**

Cuando el factor de ocupación de vehículos es alto, aumenta la probabilidad que algunos buses y (carros de) trenes circulen a capacidad, impidiendo que usuarios que esperan puedan abordar, con el consiguiente incremento en los tiempos de espera. Este efecto ha sido ampliamente tratado en la literatura de asignación de usuarios a redes de transporte público (Spiess y Florian, 1989; De Cea y Fernández, 1993). Por ejemplo, Spiess y Florian (1989) consideran que el costo de viaje en arcos depende del flujo de pasajeros, para internalizar que el tiempo de espera y la comodidad al interior de los vehículos pueden depender del número de pasajeros a bordo de un servicio. Por otro lado, Cominetti y Correa (2001) y Cepeda *et al.* (2006) modelan el tiempo de espera como inversamente proporcional a la frecuencia efectiva, la cual decrece en función del número de pasajeros aguas arriba de una parada. El modelo de Kurauchi *et al.* (2003) introduce que los pasajeros pueden ser aversos al riesgo, es decir, más proclives a tomar una línea que tiene menores niveles de ocupación para reducir la

probabilidad de no poder subirse a un bus (el efecto de la probabilidad de viajar parado o sentado en la elección de ruta es discutido en la Sección 2.6). En modelos de gran escala, el aumento de los tiempos de espera debido a restricciones de capacidad ha sido considerado en la estimación de demanda y perfiles de carga de transporte público en las redes de Londres (Department of Transport, 1989; Maier, 2011), Winnipeg, Stockholm y Santiago (Florian *et al.*, 2005), Los Angeles y Sydney (Davidson *et al.*, 2011) y San Francisco (Zorn *et al.*, 2012).

### **2.3 Efecto en la variabilidad de los tiempos de viaje**

Hemos discutido que cuando el nivel de ocupación de los vehículos se acerca a su capacidad, puede haber un aumento de los tiempos de espera y en vehículo. La variabilidad inherente a la demanda de transporte público hace, sin embargo, que tales demoras sean difíciles de predecir. Es decir, cuando los factores de ocupación son altas en promedio, los usuarios no saben si se van a poder subir a los vehículos o no, produciéndose una menor predictibilidad de los tiempos de viaje, lo que disminuye la utilidad modal más allá del aumento promedio del tiempo de espera, porque la variabilidad en los tiempos de viaje representa un costo en sí mismo para los usuarios (e.g., Senna, 1994; Bates *et al.*, 2001; Bhat y Sardesai, 2006; Li *et al.*, 2010; Börjesson *et al.*, 2012). Un segundo problema a tomar en cuenta es la posible relación entre la alta ocupación de vehículos y la ocurrencia de incidentes en paradas de bus y estaciones de trenes, los cuales también afectan negativamente la confiabilidad en el servicio.

### **2.4 Efecto en el bienestar de los usuarios**

El impacto del hacinamiento en la salud y el bienestar de las personas es un tema muy complejo de analizar. Existe una serie de factores físicos y psicológicos que intervienen en la percepción del hacinamiento y sus efectos, incluyendo un aumento de la ansiedad (Cheng, 2010), stress y sensación de cansancio (Lundberg, 1976; Mohd Mahudin *et al.*, 2011; 2012), aumento en la sensación de inseguridad, referida tanto a accidentes como a crimen (Cox *et al.*, 2006; Katz y Rahman, 2010)<sup>1</sup>, sensación de invasión de la privacidad (Wardman y Whelan, 2011), propensión a llegar tarde al trabajo (Mohd Mahudin *et al.*, 2011) y una posible pérdida de productividad para pasajeros que trabajan mientras viajan sentados (Fickling *et al.*, 2008; Gripsrud y Hjorthol, 2012).

La evidencia empírica para demostrar los efectos negativos del hacinamiento en los usuarios de transporte público es aún limitada. Lundberg (1976) midió la tasa de excreción de catecolamina en usuarios de trenes en Suecia, y encontró que la sensación de incomodidad (asociada a la excreción de catecolaminas) aumentaba a medida que el número de personas que ingresaba al tren crecía. Cheng (2010) encontró que el hacinamiento es el factor que causa más ansiedad entre los usuarios de trenes en Taiwan (por sobre otros factores como demoras, accesibilidad a la estación, buscar la plataforma y el tren apropiado, necesidad de trasbordos). En Kuala Lumpur, Mohd Mahudin *et al.* (2011) encontraron que los usuarios con mayores niveles de stress y cansancio atribuido al hacinamiento, a la vez reportan más síntomas somáticos como dolores de cabeza, tensión de músculos y dificultad para dormir. En suma, se puede concluir que los estudios existentes dan cuenta del efecto del hacinamiento en disminuir el bienestar de los viajeros, lo que afecta las decisiones de modo, ruta y tiempo de inicio de un viaje. La inclusión del hacinamiento en los modelos de demanda se analiza a continuación.

---

<sup>1</sup> Cox et al. (2006) sugiere que la relación entre el hacinamiento e inseguridad personal puede depender del tipo de crimen, pues un vehículo hacinado disminuye la probabilidad de asaltos pero hace más fácil el robo inadvertido.

## 2.5 Efecto en el valor de ahorrar tiempo de viaje

La incomodidad del hacinamiento hace que los pasajeros estén dispuestos a pagar más por reducir su tiempo de viaje en condiciones hacinadas. La relación entre el nivel de ocupación y el valor del tiempo ha sido empíricamente encontrada por varios autores, incluyendo Maunsell y Macdonald (2007), Whelan y Crockett (2009) y Hensher *et al.* (2011) para hacinamiento en vehículos, y Douglas y Karpousis (2005) para hacinamiento en estaciones de tren.

Un resultado usual de estos modelos es la estimación de un multiplicador del valor del tiempo en vehículo producto del hacinamiento (*crowding multiplier*). Sea  $VST_0$  el valor del tiempo en condiciones sin hacinamiento,  $VST_1$  el valor del tiempo hacinado, el multiplicador del hacinamiento es  $H = VST_1 / VST_0$ . Evidentemente,  $H$  y  $VST_1$  aumentan su valor en función del nivel de hacinamiento. Por ejemplo, Whelan y Crockett (2009) estiman que en trenes en Inglaterra, para pasajeros sentados  $H$  aumenta de 1.0 a 1.6 a medida que la densidad de pasajeros parados aumenta de 0 a 6 pax/m<sup>2</sup>, mientras que para pasajeros de pie  $H$  varía entre 1.5 cuando no hay otros pasajeros parados, y 2.0 aproximadamente cuando hay 6 pax/m<sup>2</sup>. Por otra parte, Wardman y Whelan (2011) revisan 17 estudios de valuación del hacinamiento en Inglaterra y encuentran que el efecto de incomodidad del hacinamiento usualmente se activa para factores de ocupación entre el 60 y el 90 por ciento de los asientos, debido a la pérdida de espacio personal o de privacidad y la dificultad de grupos de sentarse juntos, entre otros factores. También se reporta que la incomodidad del hacinamiento es mayor en viajes de ocio que en viajes motivo trabajo.

## 2.6 Efecto en la elección de ruta y vehículo

La desutilidad de viajar de pie puede influir la elección de bus y de ruta cuando los pasajeros tienen varias alternativas para realizar un viaje. Esto se ha incorporado recientemente en modelos de asignación en transporte público, como Sumalee *et al.* (2009), Leurent y Liu (2009), Hamdouch *et al.* (2011) y Schmöcker *et al.* (2011), los cuales estiman la probabilidad de obtener un asiento tanto en el momento de abordar un bus, como una vez a bordo si un pasajero tiene que estar de pie al inicio de su viaje. Los pasajeros eligen la hora de partida y la ruta dada la percepción del nivel de servicio, lo que incluye la probabilidad de obtener un asiento como un atributo clave.

Aplicaciones numéricas muestran que la disponibilidad de asientos puede influir significativamente en la hora escogida para iniciar un viaje, y las elecciones de ruta y vehículo. Por ejemplo, Leurent y Liu (2011) encuentra que la carga predicha en la red de metro de París se reduce un 30 por ciento con una formulación que distingue entre viajar sentado y parado, relativo a un modelo ocupación prevista en el metro de París se redujo en un 30 por ciento en la aplicación de un modelo que no distingue estar de pie. Raveau *et al.* (2011) muestran que el factor de ocupación de los trenes es importante para explicar la elección de ruta en la red de metro de Santiago y que el efecto no es lineal, pues aumenta con altas tasas de ocupación cuando los usuarios perciben que, aparte del efecto incomodidad del hacinamiento, hay más posibilidades de no poder subirse al primer tren (ver Sección 2.2). Kim *et al.* (2009) utilizan un experimento de preferencias declaradas en Seúl para estimar la probabilidad de que pasajeros esperen por un segundo bus cuando se entrega información en tiempo real sobre el nivel de ocupación del próximo bus que llega al paradero; los resultados muestran que en algunas circunstancias usuarios están dispuestos a dejar pasar un bus con la esperanza de que el próximo tenga menos pasajeros para poder sentarse. Esta disponibilidad a cambiar tiempo de espera por comodidad en el vehículo es lo que se observa en Santiago

cuando pasajeros de larga distancia hacen fila en un paradero para subirse a un bus sólo cuando hay un asiento disponible.

## 2.7 Efecto en la estimación de oferta y tarifa óptimas

El hacinamiento como un factor que afecta la utilidad de los viajeros y el costo generalizado de transporte ha sido incorporado por varios autores en el análisis de tarificación óptima y determinación de oferta de transporte público (Jansson, 1979; Kraus, 1991; Jansson, 1993; Arnott y Yan, 2000; Huang, 2002; Pedersen, 2003; Pels y Verhoef, 2007; Parry y Small, 2009). Cuando una persona aborda un vehículo puede imponer o aumentar las externalidades de hacinamiento en los demás usuarios, subiendo el costo marginal de viaje de los usuarios, lo que aumenta la tarifa óptima de transporte público, obtenida como la diferencia entre el costo marginal total y el costo medio de los usuarios en el *primer mejor* (see, e.g., Tisato, 1998; Jara-Díaz y Gschwender, 2005).

Por el lado de la oferta óptima, Jara-Díaz y Gschwender (2003) muestran que la frecuencia óptima de buses es más alta si los usuarios son sensibles al hacinamiento (sensibilidad que se expresa a través de un aumento en el valor del tiempo de viaje, Sección 2.5) y Tirachini (2012) encuentra que cuando los usuarios son sensibles al hacinamiento, los buses debiesen ser diseñados con el mayor número de asientos posible (pues el costo del hacinamiento depende de la proporción de usuarios de usuarios sentados y parados), mientras que si se ignora las externalidades de hacinamiento, hay situaciones en que es “óptimo” reducir el número de asientos para aumentar la capacidad de los vehículos.

En suma, el reconocimiento de las externalidades de hacinamiento en la valoración del tiempo y el impacto que tiene en el tiempo de viaje mismo tiene importantes efectos en el diseño de un sistema de transporte público, en particular en la capacidad que se provee. Cuando la comodidad y las externalidades de hacinamiento son ignoradas, los diseñadores pueden optar por proveer una capacidad solo suficiente para satisfacer la demanda, y probablemente los vehículos circularan a capacidad en algunas secciones de la red. Sin embargo, cuando el costo del hacinamiento se considera en el diseño, es óptimo proveer frecuencias de servicio más altas (y buses con el máximo número de asientos) para reducir los factores de ocupación y aumentar la calidad de servicio (Jara-Díaz y Gschwender, 2003). En la sección siguiente estimamos el valor del tiempo de viaje en función del grado de hacinamiento, en una formulación que considera por separado pasajeros sentados y parados.

## 3. ESTIMACIÓN DE LA DESUTILIDAD DEL HACINAMIENTO

En esta sección se estiman modelos de elección modal que incluyen la proporción de asientos ocupados y la densidad de pasajeros de pie como atributos en la utilidad de viajar, con los siguientes objetivos: (i) mostrar las diferencias en la estimación del valor del tiempo en vehículo (VTV) cuando se considera y cuando se ignora el hacinamiento como fuente de desutilidad para los usuarios del transporte público, y (ii) analizar el efecto de las diferentes especificaciones del hacinamiento para la estimación de VTV.

Los datos utilizados son de una encuesta de preferencias declaradas en el marco de un estudio de demanda para un posible nuevo servicio de metro en Sydney, Australia. Detalles sobre el diseño de la encuesta, área de estudio, tamaño de la muestra y las características socioeconómicas de los encuestados se describen en detalle en Hensher et al. (2011). La tasa de ocupación de los vehículos de transporte público, distinguiendo entre personas sentadas y

paradas, se representa con diagramas 2-D en las distintas alternativas (ver Hensher *et al.*, 2011, Tirachini, 2012).

Hensher *et al.* (2011) estiman la desutilidad del hacinamiento en bus, tren y metro, en función de la proporción de usuarios sentados (variable asociada a la probabilidad de obtener un asiento) y el número de usuarios de pie. En este trabajo se utiliza la densidad de pasajeros de pie por metro cuadrado (en lugar del número absoluto de pasajeros de pie) para representar de una manera más precisa la incomodidad del hacinamiento, y para tener una base común entre los tres modos de transporte público que se consideren, los cuales tienen distintos tamaños y proporciones de superficie para asientos y para estar de pie.

Con el fin de comparar los valores de VTV, se propone cinco especificaciones alternativas para la utilidad en modos de transporte público: cuatro modelos que incorporan atributos que representan el número de pasajeros sentados y de pie, interactuando con el tiempo de viaje, los que se comparan con una especificación que ignora variables de hacinamiento como fuentes de desutilidad. Si  $V_m$  es la utilidad del modo  $m$ , los cinco casos, llamados M1 a M5, se describen de la siguiente manera:

- M1: modelo sin variables de hacinamiento (ec. 1).
- M2: Sólo la densidad de pasajeros parados [ $\text{pax}/\text{m}^2$ ] impone un costo (ec. 2).
- M3: La densidad de pasajeros parados más la proporción de asientos ocupados son fuentes de desutilidad (ec. 3). En la encuesta, el porcentaje mínimo de asientos ocupados fue 25 por ciento.
- M4: La desutilidad de hacinamiento se activa cuando el factor de ocupación es 60 por ciento (con respecto al número de asientos) (ec. 4).
- M5: La desutilidad de hacinamiento se activa cuando el factor de ocupación es 90 por ciento (con respecto al número de asientos) (ec. 5).

$$V_m = \alpha_m^{\text{M1}} + \beta_a^{\text{M1}} t_{am} + \beta_h^{\text{M1}} h_m + \beta_v^{\text{M1}} t_{vm} + \beta_e^{\text{M1}} t_{em} + \beta_c^{\text{M1}} c_m \quad (1)$$

$$V_m = \alpha_m^{\text{M2}} + \beta_a^{\text{M2}} t_{am} + \beta_h^{\text{M2}} h_m + \beta_v^{\text{M2}} t_{vm} + \beta_e^{\text{M2}} t_{em} + \beta_c^{\text{M2}} c_m + \beta_{denm}^{\text{M2}} n_{denm} t_{vm} \quad (2)$$

$$V_m = \alpha_m^{\text{M3}} + \beta_a^{\text{M3}} t_{am} + \beta_h^{\text{M3}} h_m + \beta_v^{\text{M3}} t_{vm} + \beta_e^{\text{M3}} t_{em} + \beta_c^{\text{M3}} c_m + \beta_{denm}^{\text{M3}} n_{denm} t_{vm} + \beta_{seat} \max(p_{seatm} - 0.25, 0) t_{vm} \quad (3)$$

$$V_m = \alpha_m^{\text{M4}} + \beta_a^{\text{M4}} t_{am} + \beta_h^{\text{M4}} h_m + \beta_v^{\text{M4}} t_{vm} + \beta_e^{\text{M4}} t_{em} + \beta_c^{\text{M4}} c_m + \beta_{f60m} \max(lf_m - 0.6, 0) t_{vm} \quad (4)$$

$$V_m = \alpha_m^{\text{M5}} + \beta_a^{\text{M5}} t_{am} + \beta_h^{\text{M5}} h_m + \beta_v^{\text{M5}} t_{vm} + \beta_e^{\text{M5}} t_{em} + \beta_c^{\text{M5}} c_m + \beta_{f90m} \max(lf_m - 0.9, 0) t_{vm} \quad (5)$$

Los modelos M2 a M5 asumen distintos niveles del factor de ocupación mínima que provoca un efecto de hacinamiento en los pasajeros, desde 25 por ciento en M3 a 100 por ciento en M2, pasando por 60 y 90 por ciento en M4 y M5, respectivamente. En general, el umbral de factor de ocupación a partir del cual se gatilla una disminución en la comodidad depende del contexto, dado por las características culturales e idiosincráticas de los usuarios, y por el diseño y la operación de los vehículos. Por lo tanto, es útil analizar cómo los diferentes niveles de sensibilidad a la ocupación de vehículos influyen en la estimación de VTV, y consecuentemente en la predicción de demanda.

En ecuaciones (1) a (5),  $t_{am}$  y  $t_{em}$  son los tiempos de acceso y egreso, respectivamente,  $h_m$  es el intervalo entre vehículos (lo que representa una aproximación al tiempo de espera),  $t_{vm}$  es

el tiempo en vehículo,  $c_m$  es el costo o tarifa,  $n_{denm}$  es la densidad de pasajeros de pie,  $p_{seat}$  es la proporción de asientos ocupados,  $lf_m$  es el factor de ocupación,  $\alpha_m$  es una constante modal y  $\beta_k$  son los parámetros asociados a los diversos atributos. Para todos los modelos (M1 a M5), la utilidad del automóvil ( $d$ ) tiene la misma forma:  $V_d = \beta_a^{M_d} t_{ad} + \beta_{vd}^{M_d} t_{vd} + \beta_e^{M_d} t_{ed} + \beta_{cd}^{M_d} c_d$ .

La estimación de parámetros con modelos Logit Multinomial (MNL) y los tests de especificación (razón de verosimilitud) se presentan en la Tabla 1 ( $n=4152$  observaciones). Las estimaciones se hacen con el programa NLogit5.

**Tabla 1: Estimación de parámetros, modelos MNL**

Parámetro	M1	M2	M3	M4	M5
Tiempo de acceso $\beta_a$	-0.020 (-3.14)	-0.016 (-2.48)	-0.015 (-2.40)	-0.015 (-2.41)	-0.016 (-2.48)
Intervalo $\beta_h$	-0.009 (-4.29)	-0.011 (-4.91)	-0.010 (-4.83)	-0.010 (-4.85)	-0.011 (-4.92)
Tiempo en vehículo T. Pub $\beta_v$	-0.019 (-7.85)	-0.014 (-5.75)	-0.008 (-2.59)	-0.011 (-4.50)	-0.014 (-5.67)
Tiempo de egreso $\beta_e$	-0.044 (-6.30)	-0.045 (-6.34)	-0.045 (-6.42)	-0.045 (-6.40)	-0.045 (-6.34)
Tarifa $\beta_c$	-0.153 (-6.50)	-0.147 (-6.18)	-0.148 (-6.23)	-0.148 (-6.22)	-0.148 (-6.20)
Tiempo de viaje auto $\beta_v$	-0.023 (-6.72)	-0.024 (-6.98)	-0.024 (-6.98)	-0.024 (-6.98)	-0.024 (-6.98)
Costo auto $\beta_c$	-0.039 (-5.71)	-0.041 (-5.90)	-0.041 (-5.88)	-0.041 (-5.90)	-0.041 (-5.90)
Constante tren $\alpha_t$	-4.004 (-4.69)	-4.185 (-4.91)	-4.199 (-4.92)	-4.214 (-4.94)	-4.187 (-4.91)
Constante metro $\alpha_m$	-3.146 (-3.79)	-3.121 (-3.77)	-3.138 (-3.79)	-3.127 (-3.77)	-3.123 (-3.77)
Constante bus $\alpha_b$	-2.666 (-3.27)	-2.675 (-3.29)	-2.661 (-3.27)	-2.681 (-3.29)	-2.679 (-3.29)
Tiempo en vehículo* Densidad pax de pie tren $\beta_{dent}$		-0.0019 (-1.92)	-0.001 (-0.73)		
Tiempo en vehículo* Densidad pax de pie met $\beta_{denm}$		-0.0065 (-7.17)	-0.005 (-5.26)		
Tiempo en vehículo* Densidad pax de pie bus $\beta_{denb}$		-0.0026 (-3.46)	-0.002 (-2.43)		
Tiempo en vehículo* Proporción asientos ocup $\beta_{seat}$			-0.012 (-2.46)		
Tiempo en vehículo* Factor de ocupación tren $\beta_{lft}$				-0.010 (-2.60)	-0.012 (-2.04)
Tiempo en vehículo* Factor de ocupación metro $\beta_{lfm}$				-0.016 (-7.54)	-0.018 (-7.32)
Tiempo en vehículo* Factor de ocupación bus $\beta_{lfb}$				-0.006 (-4.00)	-0.006 (-3.49)
<b>Tests de especificación</b>					
Log-likelihood	-2922.3	-2888.5	-2885.5	-2885.7	-2887.3
$\rho^2$ -ajustado (relativo a constantes modales)	0.0950	0.1045	0.1052	0.1054	0.1049



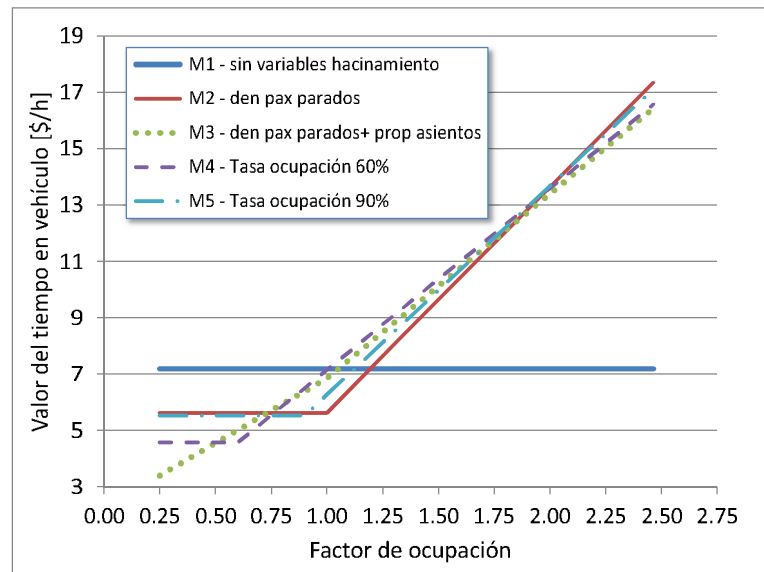
Test de razón de verosimilitud con respecto a M1		67.57 ( $> \chi_{3,0.001}$ =16.27)	73.59 ( $> \chi_{4,0.001}$ =18.47)	73.24 ( $> \chi_{3,0.001}$ =16.27)	69.92 ( $> \chi_{3,0.001}$ =16.27)
Test de razón de verosimilitud con respecto a M1			6.01 ( $> \chi_{1,0.025}$ =5.02)		

**Nota:** test  $t$  entre paréntesis. Tiempo en minutos, costo en dólares australianos de 2009.

Centrándose en las medidas de bondad de ajuste, los estadígrafos *log-likelihood* y  $\rho^2$ -ajustado muestran que los cuatro modelos con hacinamiento (M2-M5) son superiores superan el modelo sin variables hacinamiento (M1). El test de razón de verosimilitud indica que M2, M3, M4 y M5 son significativamente superiores a M1 con un nivel de confianza del 99,9 por ciento. El test de razón de verosimilitud entre modelos anidados M2 y M3 indica que M3 es superior con un nivel de confianza del 97,5 por ciento, lo que sugiere que la densidad de pasajeros de pie por sí sola no es suficiente para explicar correctamente la desutilidad del hacinamiento, sino la disponibilidad de asientos también tiene un rol en las elecciones de los encuestados.

La Figura 1 muestra el valor del tiempo en vehículo (VTV) para los cinco modelos estimados, como función del factor de ocupación y de la densidad de pasajeros de pie. En general, el modelo que es indiferente a los niveles de ocupación de los vehículos sobreestima VTV para factores de ocupación bajas (por debajo de un umbral que es entre 1,0 y 1,25, dependiendo del modelo de hacinamiento) y subestima VTV para factores de ocupación altas (más de 1,25). Es importante señalar que VTV estimado por M1, 7,2 \$/h para los modos de transporte público, (\$ representa dólar australiano, \$1=475 pesos chilenos aproximadamente), puede estar sesgados pues M1 ignora la influencia del hacinamiento en la elección de modo, el que es explícitamente mostrado en la encuesta de preferencias declaradas. Sin embargo, el valor 7,2 \$/h está dentro del intervalo de confianza estimado por Hensher *et al.* (2011), que utiliza un modelo *Error Components* con la misma base de datos y obtiene un VTV promedio de 7,7 \$/h en bus y 8,6 \$/h en tren y metro, con intervalos de confianza del 95 por ciento de (4,9, 12,3) para bus y (5,6, 12,1) para tren y el metro.

Para los modelos sensibles al hacinamiento, la Figura 1 muestra que las diferentes hipótesis sobre el factor de ocupación umbral que provoca un efecto de hacinamiento influye en el VTV, pero el efecto es mucho más notable para factores de ocupación pequeños, mientras que para altos niveles de hacinamiento todos los modelos estiman un VTV similar. En otras palabras, distintos supuestos sobre qué tan sensibles son las personas a la comodidad cuando todos los pasajeros están sentados tiene escasa influencia en el VTV cuando el sistema funciona con un alto grado de hacinamiento. Tirachini *et al.* (2013) estiman también modelos *Error Components* y encuentran diferencias en VTV con respecto a la modelación MNL, pero la forma de las curvas no cambia con respecto al resultado de los modelos MNL de la Figura 1.



**Figura 1: Valor del tiempo en vehículo en tren**

#### 4. EFECTO DEL HACINAMIENTO EN LA ESTIMACIÓN DE DEMANDA

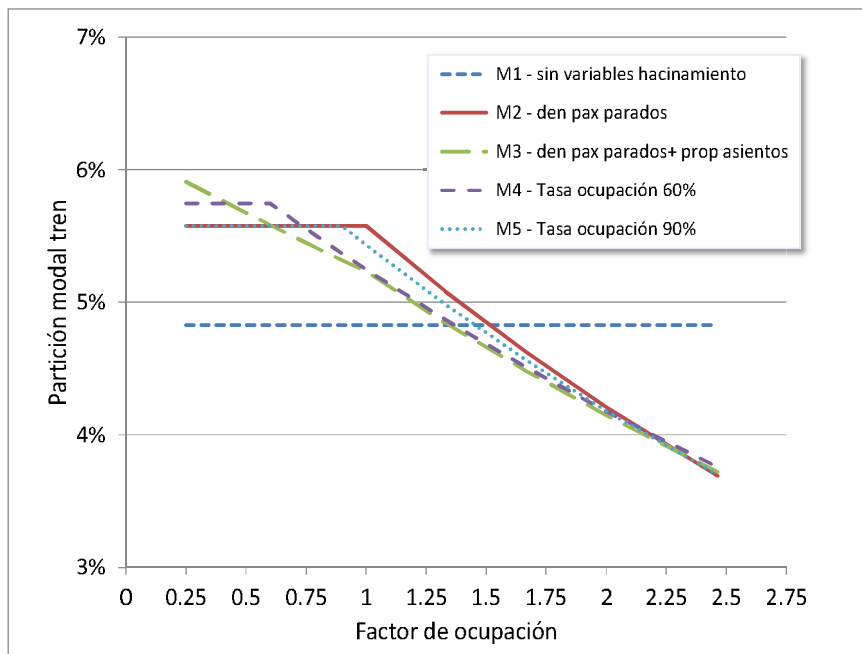
En esta sección, se analiza la elección entre dos modos – tren y auto- asumiendo distintos niveles de ocupación del tren, para un rango de tiempos de viaje, utilizando los parámetros estimados en la Tabla 1. El valor asumido de los atributos en este ejemplo se da en la Tabla 2.

**Tabla 2: Atributos para estimación de demanda**

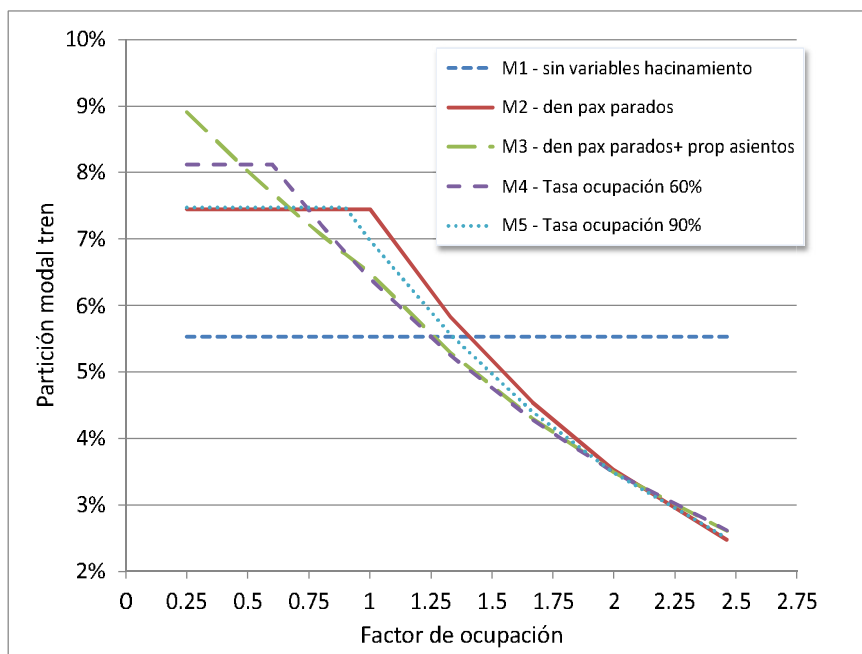
	Tiempo de acceso [min]	Intervalo [min]	Tiempo en vehículo [min]	Costo [\$]
Tren	5	10	$t$	$2.3$ if $t \leq 16.6$ $2.9$ if $16.6 < t \leq 33.3$ $3.3$ if $33.3 < t \leq 58.3$ $4.4$ if $58.3 \leq t$
Auto	2	-	$1.21t$	$15 + 0.074 \cdot 1.21t$

El tiempo de viaje en auto es asumido un 21 por ciento mayor que el del tren, dado que en promedio en Sydney los trenes son un 21 por ciento más rápidos que el modo auto-chofer (TDC, 2011). La tarifa del tren depende de la distancia de viaje, las franjas de tarifa en la Tabla 2 se calculan asumiendo una velocidad promedio del tren de 36 km/h (TDC, 2011). El costo del auto se asume como una componente fija de \$10 por estacionamiento más \$0.15 por kilómetro, con una velocidad promedio del auto de 29.3 km/h (TDC, 2011).

La Figura 4 muestra la partición modal del tren para viajes de 15 y 40 minutos (es decir, el tiempo de viaje en auto es de 18,2 y 48,4 min, respectivamente). El modelo que no es sensible al hacinamiento (M1) subestima la demanda para niveles de ocupación bajos (factor de carga inferior a 1,25-1,50, en torno a 1 pasajero de pie por metro cuadrado) y sobreestima la demanda cuando los trenes circulan con altos niveles de ocupación. Por otro lado, los modelos que son sensibles al hacinamiento (M2 a M5) muestran cómo la demanda disminuye significativamente a medida que aumenta el nivel de ocupación.



(a) Tiempo en vehículo=15 minutos



(b) Tiempo en vehículo=40 minutos

Figura 2: Partición modal del tren en función de su factor de ocupación

El resultado de Figura 2 es ilustrativo del efecto del hacinamiento para la estimación de demanda de nuevos sistemas de transporte público tales como sistemas Bus Rapid Transit, tren ligero o metro. La Figura 2 sugiere que si la demanda se estima sin consideración explícita del hacinamiento como fuente de desutilidad para los pasajeros, la demanda puede ser sobreestimada si el sistema está diseñado para tener un factor de ocupación más allá de un umbral  $\theta^*$  (en nuestro ejemplo para un factor de ocupación entre 1.25 y 1.6) ¿Existe tal umbral en otros contextos, o asumiendo otros niveles para los atributos? Suponiendo un

modelo de elección MNL, el umbral  $\theta^*$  se puede encontrar analíticamente. Sean  $V_{a1}$  y  $V_{t1}$  las utilidades del auto y tren en un modelo sin variables hacinamiento (modelo m1),  $V_{a2}$  y  $V_{t2}$  las utilidades de auto y tren en un modelo con variables hacinamiento para el modo de transporte público (modelo m2). La probabilidad de elección de tren en m1 menos la probabilidad de escoger tren de m2 se puede escribir como:

$$P_{t1} - P_{t2} = \frac{1}{1 + e^{V_{a1} - V_{t1}}} - \frac{1}{1 + e^{V_{a2} - V_{t2}}} \quad (6)$$

La utilidad  $V_{t2}$  puede ser expresada como  $V_{t2} = V_{t2}^0 + \beta\theta t$ , donde  $V_{t2}^0$  es la componente de la utilidad que no depende del nivel de hacinamiento,  $\beta$  (negativo) es la desutilidad marginal del hacinamiento,  $\theta$  es una medida del nivel de ocupación y  $t$  es el tiempo en vehículo. Entonces, el nivel de ocupación umbral  $\theta^*$  sobre el cual la probabilidad de elegir tren en m1 es mayor que en m2 está por:

$$P_{t1} > P_{t2} \Leftrightarrow \theta > \theta^* = \frac{(V_{a1} - V_{a2}) - (V_{t1} - V_{t2}^0)}{-\beta t} \quad (7)$$

donde  $-\beta$  es positivo. Notar que el nivel de ocupación  $\theta$  tiene que estar en un intervalo finito,  $\theta \in [0, \theta_{\max}]$ . Por lo tanto, si  $\theta^*$  pertenece al intervalo  $[0, \theta_{\max}]$  depende de la estimación de parámetros en los modelos m1 y m2.

## 5. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Primero, este artículo presenta una revisión bibliográfica amplia de los múltiples efectos del hacinamiento de pasajeros en la calidad de los viajes en transporte público, tiempos de espera y en vehículo, la variabilidad de los tiempos de viaje, el bienestar de los pasajeros, la elección de buses y rutas y el valor óptimo de frecuencias, diseño de vehículos y tarifas. La segunda parte del artículo aborda los efectos en el valor del tiempo de supuestos alternativos sobre el costo asociado al nivel de ocupación de los vehículos. Utilizando una encuesta de preferencias declaradas en Sydney, Australia, se ha estimado modelos de demanda que dependen de la proporción de asientos ocupados y la densidad de pasajeros de pie.

Dos conclusiones principales se obtienen que revelan los potenciales problemas de omitir la percepción del hacinamiento cuando se estima demanda de transporte público: (i) un modelo que asume los usuarios como indiferentes a los niveles de ocupación sobreestima el valor del tiempo en vehículo (VTV) para factores de carga bajos, y subestima VTV con niveles altos de hacinamiento, y (ii) un modelo que no es sensible al hacinamiento subestima la demanda si el sistema se diseña para tener bajos factores de ocupación, y sobreestima la demanda si el diseño considera altos factores de ocupación. La generalidad de estos resultados no ha sido probada, sin embargo, usando un modelo logit multinomial se encuentra analíticamente un umbral de ocupación que marca la subestimación o sobreestimación de la demanda cuando se ignora el efecto del hacinamiento en la demanda. Más investigación es necesaria para explorar si estos resultados se mantienen con modelos de elección más complejos y en otros contextos. Las repercusiones de estos resultados para el análisis costo-beneficio y las políticas de transporte público son claras: Los efectos del hacinamiento en la oferta y en la demanda deben ser considerado desde las etapas de diseño y evaluación de sistemas de transporte público, así como también en la estimación de demanda y de beneficios sociales.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio es parcialmente financiado por el Instituto Milenio Sistemas Complejos de Ingeniería (ICM P-05-004-F, CONICYT FBO16).

## REFERENCIAS

- Arnott, R. y A. Yan (2000) The two-mode problem: second-best pricing and capacity. **Review of Urban & Regional Development Studies** 12(3): 170-199.
- Bates, J., J. Polak, P. Jones y A. Cook (2001) The valuation of reliability for personal travel. **Transportation Research Part E** 37(2-3): 191-229.
- Bhat, C. R. y R. Sardesai (2006) The impact of stop-making and travel time reliability on commute mode choice. **Transportation Research Part B** 40(9): 709-730.
- Börjesson, M., J. Eliasson y J. P. Franklin (2012) Valuations of travel time variability in scheduling versus mean-variance models. **Transportation Research Part B** 46(7): 855-873.
- Cepeda, M., R. Cominetti y M. Florian (2006) A frequency-based assignment model for congested transit networks with strict capacity constraints: characterization and computation of equilibria. **Transportation Research Part B** 40(6): 437-459.
- Cominetti, R. y J. Correa (2001) Common-lines and passenger assignment in congested transit networks. **Transportation Science** 35(3): 250-267.
- Cox, T., J. Houdmont y A. Griffiths (2006) Rail passenger crowding, stress, health and safety in Britain. **Transportation Research Part A** 40(3): 244-258.
- Cheng, Y.-H. (2010) Exploring passenger anxiety associated with train travel. **Transportation** 37(6): 875-896.
- Davidson, B., P. Vovsha, M. Abedini, C. Chu y R. Garland (2011) Impact of capacity, crowding, and vehicle arrival adherence on public transport ridership: Los Angeles and Sydney experience and forecasting approach. **Australasian Transport Research Forum**, Adelaide, Australia, 28-30 September 2011
- De Cea, J. y J.E. Fernández (1993) Transit assignment for congested public transport systems: an equilibrium model. **Transportation Science** 27, 133-147
- Department of Transport (1989) **Central London Rail Study**. A joint study by the Department of Transport, British Rail Network South East, London Regional Transport and London Underground Ltd.
- Fernández, R. (2011) Experimental study of bus boarding and alighting times. **European Transport Conference, Glasgow**, 10-12 October 2011.
- Fickling, R., H. Gunn, H. Kirby, M. Bradley y C. Heywood (2008) The productive use of rail travel time and value of travel time saving for travellers in the course of work. **European Transport Conference**.
- Fletcher, G. y A. El-Geneidy (2013) The effects of fare payment types and crowding on dwell time: A fine-grained analysis. **92nd TRB Annual Meeting**, Washington D.C.
- Florian, M., S. He y I. Constantin (2005) An EMME/2 macro for transit equilibrium assignment which satisfies capacity of transit services. **EMME/2 Conference**, Shanghai.
- Gibson, J., R. Fernández y A. Albert (1997). Operación de Paraderos Formales en Santiago. Proceedings VIII Chilean Conference of Transport Engineering
- Gripsrud, M. y R. Hjorthol (2012) Working on the train: from 'dead time' to productive and vital time. **Transportation** 39(5): 941-956.
- Hamdouch, Y., H. W. Ho, A. Sumalee y G. Wang (2011) Schedule-based transit assignment model with vehicle capacity and seat availability. **Transportation Research Part B** 45(10): 1805-1830.

- Hensher, D. A., J. M. Rose y A. Collins (2011) Identifying commuter preferences for existing modes and a proposed Metro in Sydney, Australia with special reference to crowding. **Public Transport** 3(2): 109-147.
- Huang, H.-J. (2002) Pricing and logit-based mode choice models of a transit and highway system with elastic demand. **European Journal of Operational Research** 140(3): 562-570.
- Jaiswal, S., J. Bunker y L. Ferreira (2007) Operating characteristics and performance of a busway transit station. **30th Australasian Transport Research Forum**, Melbourne, 25-27 September.
- Jaiswal, S., J. Bunker y L. Ferreira (2010) Influence of platform walking on BRT station bus dwell time estimation: Australian analysis. **Journal of Transportation Engineering** 136(12): 1173-1179.
- Jansson, J. O. (1979) Marginal cost pricing of scheduled transport services. **Journal of Transport Economics and Policy** 13(3): 268-294.
- Jansson, K. (1993) Optimal public transport price and service frequency. **Journal of Transport Economics and Policy** 27(1): 33-50
- Jara-Díaz, S. R. y A. Gschwender (2003) Towards a general microeconomic model for the operation of public transport. **Transport Reviews** 23(4): 453 - 469.
- Jara-Díaz, S. R. y A. Gschwender (2005) Making pricing work in public transport provision. In: Button, K.J., Hensher, D.A. (eds.) **Handbook of Transport Strategy, Policy and Institutions**, Elsevier Ltd, Amsterdam: 447-459.
- Katz, D. y M. M. Rahman (2010) Levels of overcrowding in bus system of Dhaka, Bangladesh. **Transportation Research Record** 2143: 85-91.
- Katz, D. y L. A. Garrow (2012) The impact of bus door crowding on operations and safety. **Journal of Public Transportation** 15(2): 71-93.
- Kraus, M. (1991) Discomfort externalities and marginal cost transit fares. **Journal of Urban Economics** 29(2): 249-259.
- Kurauchi, F., M. Bell y J.-D. Schmöcker (2003) Capacity constrained transit assignment with common lines. **Journal of Mathematical Modelling and Algorithms** 2(4): 309-327.
- Leurent, F. y K. Liu (2009) On seat congestion, passenger comfort and route choice in urban transit: a network equilibrium assignment model with application to Paris. **88th Annual Transportation Research Board Meeting**, Washington, DC, January 2009.
- Li, Z., D. A. Hensher y J. M. Rose (2010) Willingness to pay for travel time reliability in passenger transport: A review and some new empirical evidence. **Transportation Research Part E** 46(3): 384-403.
- Lin, T. y N. H. M. Wilson (1992) Dwell time relationships for light rail systems **Transportation Research Record** 1361: 287-295.
- Lundberg, U. (1976) Urban commuting: crowdedness and catecholamine excretion. **Journal of Human Stress** 2(3): 26-36.
- Maier, H. (2011) CAPTRAS and CONGRAS: Alternative ways of modelling crowding in RAILPLAN. **UK EMME Users' Conference, London, 22 June 2011**.
- Maunsell, F. y M. Macdonald (2007) **Rail overcrowding, reliability and frequency**. Report for Centro, the West Midlands Passenger Transport Executive.
- Milkovits, M. N. (2008) Modeling the factors affecting bus stop dwell time: use of automatic passenger counting, automatic fare counting, and automatic vehicle location data. **Transportation Research Record** 2072: 125-130.
- Mohd Mahudin, N. D., T. Cox y A. Griffiths (2011) Modelling the spillover effects of rail passenger crowding on individual well being and organisational behaviour. In Pratelli, A. and Brebbia, C.A. (eds): **Urban Transport XVII, Urban Transport and the Environment in the 21st Century**. WIT Transactions on The Built Environment, WIT Press, 227-238.
- Mohd Mahudin, N. D., T. Cox y A. Griffiths (2012) Measuring rail passenger crowding: Scale development and psychometric properties. **Transportation Research Part F** 15(1): 38-51.

- Oldfield, R. H. y P. H. Bly (1988) An analytic investigation of optimal bus size. **Transportation Research Part B** 22(5): 319-337.
- Parry, I. W. H. y K. A. Small (2009) Should urban transit subsidies be reduced? **American Economic Review** 99(3): 700-724.
- Pedersen, P. A. (2003) On the optimal fare policies in urban transportation. **Transportation Research Part B** 37(5): 423-435.
- Pels, E. y E. Verhoef (2007) Infrastructure pricing and competition between modes in urban transport. **Environment and Planning A** 39: 2119-2138.
- Raveau, S., J. C. Muñoz y L. de Grange (2011) A topological route choice model for metro. **Transportation Research Part A** 45(2): 138-147.
- Schmöcker, J.-D., A. Fonzone, H. Shimamoto, F. Kurauchi y M. G. H. Bell (2011) Frequency-based transit assignment considering seat capacities. **Transportation Research Part B** 45(2): 392-408.
- Senna, L. A. D. S. (1994) The influence of travel time variability on the value of time. **Transportation** 21: 203-228.
- Spiess, H. y M. Florian (1989) Optimal strategies: a new assignment model for transit networks. **Transportation Research Part B** 23(2): 83-102.
- Sumalee, A., Z. Tan y W. H. K. Lam (2009) Dynamic stochastic transit assignment with explicit seat allocation model. **Transportation Research Part B** 43(8-9): 895-912.
- TDC (2011) 2009/10 **Household Travel Survey**. Summary Report, Transport Data Centre, Transport NSW.
- Tirachini, A. (2012) **Multimodal pricing and the optimal design of bus services: new elements and extensions**. PhD thesis, The University of Sydney. <http://ses.library.usyd.edu.au/handle/2123/8584>.
- Tirachini, A. (2013) Bus dwell time: the effect of different fare collection systems, bus floor level and age of passengers. **Transportmetrica A** 9(1): 28-49.
- Tirachini, A., D. A. Hensher y J. M. Rose (2013) **Crowding in public transport systems: effects on users, operation and implications for the estimation of demand**. **Transportation Research Part A** 53: 36-52
- Tisato, P. (1998) Optimal bus subsidy and cross subsidy with a logit choice model. **Journal of Transport Economics and Policy** 32(3): 331-350.
- TRB (2003) **Transit capacity and quality of service manual**. TCRP Report 100.
- Wardman, M. y G. A. Whelan (2011) Twenty years of rail crowding valuation studies: evidence and lessons from British experience. **Transport Reviews** 31(3): 379-398.
- Whelan, G. y J. Crockett (2009). An investigation of the willingness to pay to reduce rail overcrowding. **International Conference on Choice Modelling**, Harrogate, England, April.
- Yáñez, M. F., P. Mansilla y J. d. D. Ortúzar (2010) The Santiago Panel: measuring the effects of implementing Transantiago. **Transportation** 37(1): 125-149.
- Zorn, L., E. Sall y D. Wu (2012) Incorporating crowding into the San Francisco activity-based travel model. **Transportation** 39(4): 755-771.