

# Análisis de Estrategias de Comportamiento en un Sistema de Transporte Público

Sebastián Raveau  
Pontificia Universidad Católica de Chile  
sraveau@uc.cl

Juan Carlos Muñoz  
Pontificia Universidad Católica de Chile  
jcm@ing.puc.cl

## RESUMEN

Entender y modelar las elecciones de ruta dentro de un sistema de transporte público resulta fundamental para la planificación de sistemas de transporte urbano. Para esto, es necesario identificar y modelar las estrategias de comportamiento de los individuos. En este estudio se contrastan los supuestos tradicionales utilizados en la literatura con evidencia empírica del comportamiento de usuarios de transporte público. Los resultados indican que dentro de una población pueden existir distintos tipos de individuos respecto de las estrategias de elección de ruta, un fenómeno que suele ser obviado al modelar sus decisiones.

*Palabras claves:* estrategias de comportamiento, elección de ruta, modelos de demanda

## ABSTRACT

Understanding and modelling route choices in a public transportation system is a key element in urban transportation planning. For doing this is necessary to identify and model the individuals' behaviour strategies. In this study we compare the traditional assumptions found in the literature with empiric evidence of the behaviour of public transportation users. The results show that inside a population they may be different types of individuals regarding route choice strategies, a phenomenon that tends to be obviated when modelling their choices.

*Keywords:* behaviour strategies, route choice, demand modelling

## 1. INTRODUCCIÓN

Los modelos tradicionales de elección de ruta (o asignación de viajes), ya sea en redes de transporte privado o transporte público, asumen viajeros racionales que buscan maximizar la utilidad (o en su defecto, minimizar el costo) asociada a las distintas alternativas de viaje. En particular, en redes de transporte público con incertidumbre en los tiempos de espera (i.e. sistemas basados en frecuencia en los cuales no existen tablas horarias) los individuos pueden reducir su tiempo total esperado de viaje mediante distintas estrategias de comportamiento asociadas a la selección de ruta de viaje.

Las diferentes estrategias de elección de ruta que los usuarios pueden adoptar difieren en complejidad y requieren distintos grados de información del sistema. En la literatura, es usual asumir que todos los usuarios son capaces de considerar estrategias de alta complejidad (las cuales pueden requerir capacidades analíticas importantes). De igual manera, en la literatura se suele asumir que los usuarios poseen información perfecta acerca de los niveles de servicio de todas las alternativas disponibles. Por supuesto, esto puede no ser cierto para una proporción no menor de usuarios del sistema de transporte público.

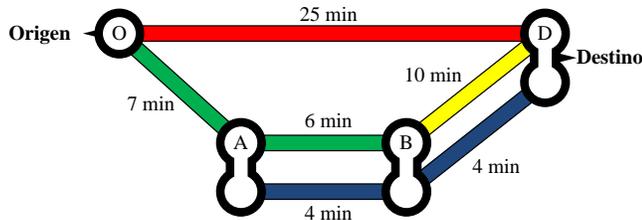
En este artículo buscamos contrastar los supuestos teóricos tradicionalmente utilizados en la modelación de estrategias de elección de ruta dentro de un sistema de transporte público con las decisiones efectivamente realizadas por usuarios del sistema. En la Sección 2 presentamos el marco metodológico de las diferentes estrategias de elección de ruta en un sistema de transporte público; en la Sección 3 presentamos la base de datos utilizada para el análisis; en la Sección 4 presentamos los principales resultados del análisis de estrategias de elección de ruta; y finalmente en la Sección 5 presentamos las principales conclusiones del estudio.

## 2. ESTRATEGIAS DE ELECCIÓN DE RUTA

En la literatura es posible identificar tres estrategias de comportamiento asociadas a la elección de ruta: (i) Itinerarios Mínimos, (ii) Rutas Mínimas, y (iii) Estrategias Mínimas. Estas estrategias difieren en la complejidad de los criterios de selección de ruta. Para presentar las tres estrategias nos basaremos en el ejemplo elaborado por Spiess y Florian (1989). En la Figura 1 se presenta una red de transporte público para viajar entre un origen y un destino. La red consta de cuatro líneas de transporte público presentadas en distintos colores, cuyos tiempos de viaje entre paradas se presentan en la Figura.

Adicionalmente, asumimos que los intervalos de pasada de las líneas siguen una distribución exponencial (de modo que el tiempo esperado de espera corresponde al inverso de la frecuencia) y que no existe congestión. Sus frecuencias de operación se presentan en la Tabla 1.

Una estrategia de elección de ruta consiste en el conjunto de reglas de selección de líneas de transporte público y estaciones de transbordo que aplica un viajero para llegar de su origen a su destino. Por ejemplo, para la red presentada en la Figura 1 dos posibles estrategias son: “tomar la línea verde hasta A y luego la línea azul hasta el destino” o “tomar la línea verde hasta B y luego tomar la primera línea que pase entre la amarilla y la azul”.



**FIGURA 1: Ejemplo de Red de Transporte Público**  
Fuente: Elaboración propia a partir de Spiess y Florian (1989)

**TABLA 1: Frecuencias de las Líneas de Transporte Público del Ejemplo**

Línea	Frecuencia	Tiempo Esperado de Espera
Roja	10 buses/hora	6 minutos
Verde	10 buses/hora	6 minutos
Azul	4 buses/hora	15 minutos
Amarilla	20 buses/hora	3 minutos

Fuente: Elaboración propia

**2.1 Itinerarios Mínimos**

Esta estrategia es la más sencilla de las estrategias de comportamiento dentro de una red de transporte público. Un itinerario corresponde a una secuencia de estaciones de transbordo y líneas de transporte público que unen el origen con el destino. La elección del itinerario mínimo consiste en encontrar el itinerario que posea el menor tiempo total de viaje hasta el destino. En la red de ejemplo presentada en la Figura 1 existen 5 itinerarios razonables (i.e. que no impliquen tomar dos veces la misma línea ni devolverse) para viajar entre el origen y el destino. Estos itinerarios se describen a continuación:

Itinerario 1: O – Roja – D

- Tiempo de viaje: 25 min
- Tiempo de espera: 6 min
- Tiempo total: 31 min

Itinerario 2: O – Verde – A – Azul – D

- Tiempo de viaje: 7 min + 8 min = 15 min
- Tiempo de espera: 6 min + 15 min = 21 min
- Tiempo total: 36 min

Itinerario 3: O – Verde – A – Azul – B – Amarilla – D

- Tiempo de viaje: 7 min + 4 min + 10 min = 21 min
- Tiempo de espera: 6 min + 15 min + 3 min = 24 min
- Tiempo total: 45 min

Itinerario 4: O – Verde – B – Azul – D

- Tiempo de viaje: 13 min + 4 min = 17 min
- Tiempo de espera: 6 min + 15 min = 21 min
- Tiempo total: 38 min

Itinerario 5: O – Verde – B – Amarilla – D

- Tiempo de viaje: 13 min + 10 min = 23 min
- Tiempo de espera: 6 min + 3 min = 9 min
- Tiempo total: 32 min

Podemos apreciar que el itinerario 1 posee el menor tiempo total de viaje, de modo que corresponde al itinerario mínimo. En base a este criterio todos los individuos que viajen entre el origen y destino elegirán la línea roja. Las tres líneas restantes no debiesen ser elegidas por ningún viajero.

**2.2 Rutas Mínimas**

Esta estrategia se basa en seleccionar entre cada par de estaciones un conjunto de “líneas atractivas” o “líneas comunes” para realizar el viaje (Chriqui y Robillard, 1975), con el objetivo de reducir el tiempo esperado de espera y, por lo tanto, reducir el tiempo total de viaje entre el origen y el destino. A diferencia del enfoque de Itinerarios Mínimos, entre cada par de estaciones sucesivas los viajeros abordarán la primera línea atractiva que arribe, en vez de esperar una única línea en particular. La probabilidad de abordar cada una de las líneas pertenecientes al conjunto de líneas comunes será proporcional a su frecuencia.

Para la red de ejemplo presentada en la Figura 1, podemos analizar si es conveniente definir un conjunto de líneas comunes entre las paradas A y B (abordando la primera línea entre la verde y la azul) y entre las paradas B y D (abordando la primera línea entre la amarilla y la azul). Entre A y B la mejor alternativa sin líneas comunes es la línea verde (6 minutos de espera + 6 minutos de viaje = 12 minutos totales de viaje). Si consideramos abordar el primer bus de ambas líneas, el tiempo de espera esperado es  $\frac{1}{(1/6+1/15)} \approx 4,29$  minutos y el tiempo de viaje es  $\frac{6 \cdot 1/6 + 4 \cdot 1/15}{(1/6+1/15)} \approx 5,43$  minutos, por lo que el tiempo total de viaje se reduce a 9,72 minutos. De esta manera, entre A y B es conveniente considerar líneas comunes (ambas líneas son atractivas). Análogamente, entre B y D tanto la línea amarilla como la línea azul son atractivas, proporcionando un tiempo total de viaje de 11,5 minutos (2,5 minutos de espera y 9 minutos de viaje).

En la red de ejemplo presentada en la Figura 1 existen 4 rutas para viajar entre el origen y el destino. En este caso no se garantiza que en la ruta mínima una misma línea se pueda esperar para abordar más de una vez. Por ejemplo, se podía abordar la línea verde entre O y A, para luego abordar la primera entre la línea verde (nuevamente) y la línea azul entre A y B. Las 4 rutas se describen a continuación:

Ruta 1: O – Roja – D

- Tiempo de viaje: 25 min
- Tiempo de espera: 6 min
- Tiempo total: 31 min

Ruta 2: O – Verde – A – Azul – D

- Tiempo de viaje: 7 min + 8 min = 15 min
- Tiempo de espera: 6 min + 15 min = 21 min
- Tiempo total: 36 min

Ruta 3: O – Verde – A – Verde/Azul – B – Azul/Amarilla – D

- Tiempo de viaje: 7 min + 5,43 min + 9 min = 21,43 min
- Tiempo de espera: 6 min + 4,29 min + 2,5 min = 12,79 min
- Tiempo total: 34,22 min

Ruta 4: O – Verde – B – Azul/Amarilla – D

- Tiempo de viaje: 13 min + 9 min = 22 min
- Tiempo de espera: 6 min + 2,5 min = 8,5 min
- Tiempo total: 30,5 min

Podemos apreciar que la ruta 4 posee el menor tiempo total de viaje, de modo que corresponde a la ruta mínima. Dicho tiempo (30,5 minutos) es menor que el tiempo asociado al itinerario mínimo (31 minutos). En base a este criterio todos los individuos que viajen entre el origen y destino abordarán la línea verde entre el origen y la estación B, para luego abordar la primera que pase entre la línea amarilla y la línea azul. En este caso nadie elegirá la línea roja.

### 2.3 Estrategias Mínimas

Esta estrategia de comportamiento, tal como lo indica su nombre, es la que garantiza los menores tiempos totales de viaje entre el origen y el destino. Propuesta, por Spiess y Florian (1989), extiende el concepto de líneas comunes propuesto por Chriqui y Robillard (1975) a elecciones de itinerarios que no poseen la misma secuencia de estaciones intermedias entre el origen y el destino. Por ejemplo, para la red de la Figura 1 podría darse la situación de elección “abordar la primera línea entre la roja y la verde”, aún cuando ambas líneas necesariamente conducen a estaciones diferentes. De esta manera se generan híper-rutas (Nguyen and Pallottino, 1988) que se diferencian de las posibles rutas de elección bajo el enfoque de Rutas Mínimas. La probabilidad de abordar cada una de las líneas pertenecientes a la estrategia óptima será proporcional a su frecuencia.

En la red de ejemplo presentada en la Figura 1 existen 29 estrategias para viajar entre el origen y el destino, por lo que sólo presentamos la estrategia mínima; detalles acerca de cómo obtener dicha estrategia pueden encontrarse en Spiess y Florian (1989). Es importante notar que este enfoque garantiza que, a diferencia del enfoque de Ruta Mínimas, en la estrategia mínima una misma línea no se pueda esperar para abordar más de una vez.

La estrategia mínima consiste en abordar en el origen la primera línea entre la roja y la verde: si es la roja, se viaja hasta el destino; si es la verde, se viaja hasta la estación B. En la estación B se aborda la primera línea entre la azul y la amarilla. Es posible apreciar que en este caso la estrategia mínima está compuesta por el itinerario mínimo (Itinerario 1 presentado en la Sección 2.1 y Ruta 1 presentada en la Sección 2.2) y la ruta mínima (Ruta 4 presentada en la Sección 2.2).

Estrategia Mínima:

$$\{ O - \text{Roja} - D \} / \{ O - \text{Verde} - B - \text{Azul/Amarilla} - D \}$$

$$\text{-Tiempo de viaje: } \frac{25 \cdot 1/6 + 22 \cdot 1/6}{(1/6 + 1/6)} = 23,5 \text{ min}$$

$$\text{-Tiempo de espera: } \frac{1 + 2,5 \cdot 1/6}{(1/6 + 1/6)} = 4,25 \text{ min}$$

$$\text{-Tiempo total: } 27,75 \text{ min}$$

Podemos apreciar que el tiempo total de la estrategia mínima (27,75 minutos) es menor que el tiempo total de la ruta mínima (30,5 minutos). En base a este criterio todas las líneas serán utilizadas en al menos un tramo para viajar entre el origen y el destino.

### 2.4 Estrategias de Elección de Ruta e Incertidumbre

A partir de la aplicación de las tres estrategias estudiadas al ejemplo presentado en la Figura 1, en la Tabla 2 se indican los resultados más relevantes para ser analizados. Como es de esperar, a medida que los viajeros aumentan la complejidad de sus estrategias de comportamiento es posible obtener menores tiempos totales de viaje. La principal diferencia entre la aplicación de las distintas estrategias de comportamiento a la red de ejemplo radica en los flujos resultantes. Por ejemplo, mientras el enfoque de Itinerarios Mínimos indica que todos los viajes se realizarán por la línea roja, de acuerdo al enfoque de Rutas Mínimas nadie utilizará dicha línea (aún cuando la diferencia en los tiempos totales de viaje es de sólo 30 segundos).

TABLA 2: Resultados del Ejemplo de Estrategias de Comportamiento

Resultado	Itinerarios Mínimos	Rutas Mínimas	Estrategias Mínimas
Flujo Línea Roja O-D	100 %	0 %	50 %
Flujo Línea Verde O-A	0 %	100 %	50 %
Flujo Línea Verde A-B	0 %	100 %	50 %
Flujo Línea Azul A-B	0 %	0 %	0 %
Flujo Línea Azul B-D	0 %	16,7 %	8,3 %
Flujo Línea Amarilla B-D	0 %	83,3 %	41,7 %
Tiempo de Viaje	25 min	22 min	23,5 min
Tiempo de Espera	6 min	8,5 min	4,25 min
Tiempo Total	31 min	30,5 min	27,75 min

Fuente: Elaboración propia

A partir de las enormes diferencias en término de los flujos obtenidos es claro que la selección de una estrategia u otra para modelar el comportamiento de los viajeros en una red de transporte público es un tema sensible y relevante. En la literatura especializada se suele asumir que todos los individuos, siendo racionales, se comportan de acuerdo enfoques más complejos como Rutas Mínimas o Estrategias Mínimas. Es por esto que tradicionalmente los desarrollos metodológicos en términos de congestión y capacidad (De Cea y Fernández, 1993), aleatoriedad en los niveles de servicio (Lam *et al.*, 1999), confiabilidad (Shimamoto *et al.*, 2010) o intermodalidad (Ziliaskopoulos *et al.*, 2000) corresponden a extensiones de dichos enfoques. Sin embargo, no existe evidencia empírica suficiente para respaldar o desaprobar dicho supuesto; posiblemente dentro de cualquier sistema de transporte público urbano existen distintos tipos de viajeros que se comporten según las tres estrategias.

Otro aspecto relevante de las tres estrategias de comportamiento presentadas es que son de carácter determinístico. Esto se debe a que asumen que los viajeros poseen información perfecta y que todos se comportan de la misma manera. Por ejemplo, bajo el enfoque de Itinerarios Mínimos se asume que todos los viajeros elegirán el itinerario 1, aun cuando el itinerario 5 posee un tiempo total de viaje apenas un minuto mayor. Esto implica que los flujos resultantes pueden ser muy inestables: si la línea amarilla aumenta su frecuencia de modo que el tiempo total del itinerario 5 baja a 30,9 minutos todos los viajeros cambiarán su elección (de modo que la línea roja pasará de llevar al 100 % de los viajeros a no ser utilizada). El mismo problema puede existir con los enfoques de Rutas Mínimas y Estrategias Mínimas.

Para resolver la inestabilidad de los enfoques determinísticos, es posible plantear modelos estocásticos donde cada alternativa (ya sea un itinerario, una ruta o una estrategia) tiene una posibilidad de ser escogido. Consideramos un modelo de utilidad aleatoria, donde asumimos que cada individuo  $q$  elige una alternativa  $i$  dentro de un conjunto  $A(q)$  de alternativas disponibles, de modo de obtener el máximo nivel de utilidad  $U_{iq}$ .

De igual manera se asume que el modelador, quien es sólo un observador sin información perfecta respecto del proceso de toma de decisiones, tan sólo es capaz de definir una utilidad representativa  $V_{iq}$ . De esta manera, es necesario considerar una componente de error  $\varepsilon_{iq}$  a cada alternativa (McFadden, 1974), típicamente según se indica en (1).

$$U_{iq} = V_{iq} + \varepsilon_{iq} \quad (1)$$

La utilidad representativa  $V_{iq}$  es función de distintos atributos  $X_{ikq}$  relacionados con las alternativas y los individuos (e.g. tiempo de viaje, transbordos, características socio-económicas). Generalmente se asume que  $V_{iq}$  es una función lineal de los atributos, como se indica en (2), donde  $\theta_{ik}$  son parámetros a ser estimados.

$$V_{iq} = \sum_k \theta_{ik} \cdot X_{ikq} \quad (2)$$

Para caracterizar las decisiones de los individuos, variables binarias  $d_{iq}$  que toman valores según se indica en (3) son necesarias. Estas variables binarias corresponden a las decisiones efectivamente realizadas por los viajeros.

$$d_{iq} = \begin{cases} 1 & \text{si } U_{iq} \geq U_{jq}, \quad \forall j \in A(q) \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3)$$

Si se asume que las componentes de error  $\varepsilon_{iq}$  distribuyen i.i.d. Gumbel, se obtiene un modelo Logit Multinomial (MNL), para el cual es posible obtener una expresión analítica para las probabilidades  $P_{iq}$  de elección, de acuerdo a (4). A partir de los atributos  $X_{ikq}$  y las elecciones  $d_{iq}$ , los parámetros  $\theta_{ik}$  pueden ser estimados utilizando Máxima Verosimilitud.

$$P_{iq} = \frac{\exp(V_{iq})}{\sum_{j \in A(q)} \exp(V_{jq})} \quad (4)$$

Es importante notar que el supuesto de independencia entre las alternativas puede ser poco realista, debido a que en redes de transporte público urbano es probable que distintas alternativas (ya sean itinerarios, rutas o estrategias) posean arcos comunes. Esta superposición topológica genera correlación espacial entre las alternativas. Para atender este problema, diversos modelos (principalmente extensiones del modelo MNL) han sido propuestos en la literatura. La utilización y análisis de dichos modelos escapa los alcances de este estudio; detalles respecto de modelos de elección de ruta que consideren correlación entre alternativas puede encontrarse en Prato (2009).

A modo de ejemplo, si consideramos el modelo MNL señalado en (5) para asignar los viajes bajo el enfoque de Itinerarios Mínimos, obtenemos una que las probabilidades de escoger cada itinerario son: itinerario 1: 58,1%, itinerario 2: 2,8%, itinerario 3: 0,1%, itinerario 4: 1,8%, e itinerario 5: 35,3%. Estas probabilidades asumen que las alternativas son independientes, aun cuando los itinerarios comparten arcos. Esta solución es estable ante cambios en los niveles de servicio y posiblemente puede reproducir mejor (mediante el ajuste de los parámetros) el comportamiento de los viajeros.

$$P_i = \frac{\exp(-0,5 \cdot T_{Viaje i} - 0,5 \cdot T_{Espera i})}{\sum_{j \in A(q)} \exp(-0,5 \cdot T_{Viaje j} - 0,5 \cdot T_{Espera j})} \quad (5)$$

### 3. ENCUESTA DE VIAJES EN TRANSPORTE PÚBLICO

A fin de identificar y analizar las estrategias de elección de ruta de usuarios de transporte público de Santiago, entre el 29 de Junio y el 1 de Julio de 2011 se realizó una encuesta de viajes en la red de Transantiago en Plaza de Maipú. Adicionalmente se cuenta con datos provenientes de dos encuestas preparatorias, realizadas el 17 y 23 de Junio de 2011 en el mismo lugar. Los datos provenientes de las encuestas (información de demanda) fueron complementados con información de niveles de servicio proporcionados por Transantiago y medidos en terreno (información de oferta). Los destinos seleccionados corresponden a las comunas de Estación Central, Santiago, Providencia, Las Condes, Vitacura y Lo Barnechea. En la Figura 2 se presenta la información geográfica de la encuesta: en amarillo se presenta el origen de los viajes (Plaza de Maipú), en rojo la comuna de Maipú y en azul las comunas consideradas como destino de los viajes.

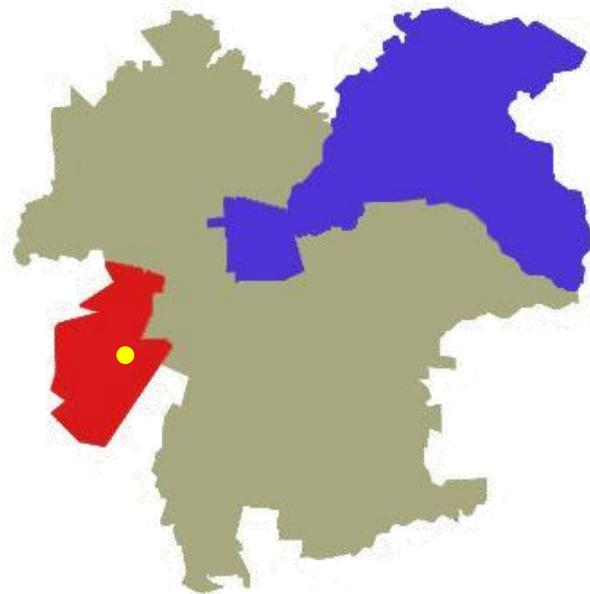


FIGURA 2: Información Geográfica de la Encuesta Realizada

Fuente: Elaboración propia

El objetivo principal de la encuesta realizada fue recabar información masiva de las elecciones de modo y ruta dentro de Transantiago. Es importante notar que, dado que se trata de un sistema integrado ambas elecciones ocurren simultáneamente, generándose rutas multimodales. Adicionalmente se obtuvo información de las características socio-económicas de los viajeros. Plaza de Maipú es un punto interesante de la red de Transantiago, pues allí se concentra el 1% de todos en transporte público de la ciudad durante la mañana (aproximadamente 30.000 viajes entre las 7:00 hrs y 12:00 hrs). En la encuesta se obtuvieron respuestas provenientes de 1.892 individuos de diversas características socio-económicas. De igual manera, Plaza de Maipú es un lugar atractivo pues en dirección a las zonas de destino presenta acceso a una línea de Metro, dos líneas alimentadoras, ocho líneas troncales y dos líneas expresas. Por lo tanto, en la encuesta fue posible capturar elecciones para todas las alternativas modales de Transantiago.

Dentro de la encuesta se puso énfasis en obtener información de las estrategias de comportamiento de los usuarios (i.e. si tomaban decisiones bajo un enfoque de Itinerarios Mínimos, Rutas Mínimas o Estrategias Mínimas).

Como es de esperar, las tres estrategias de comportamiento fueron reportadas por los viajeros. Es importante notar que el 51% de los usuarios poseía una única alternativa de viaje en cada uno de los tramos de su viaje (por ejemplo, aquellos que viajaban en Metro). El 49% restante tenía la posibilidad de elegir una estrategia de comportamiento para viajar; entre ellos el 67% se comportaba según Itinerarios Mínimos, 29% se comportaba según Rutas Mínimas, y sólo 4% se comportaba según Estrategias Mínimas. Resulta evidente que los suponer en este caso que todos los individuos se comportan según Estrategias Mínimas, como suele plantearse en la literatura, puede llevar a errores.

Dada la baja proporción de viajeros que se comportan según Estrategias Mínimas, centraremos el análisis en entender las diferencias entre el 67% de los individuos que no considera líneas comunes y el 33% que si considera líneas comunes. Es importante notar que, en general, las distintas alternativas de viaje entre cada par de estaciones suelen compartir infraestructura, de modo que los tiempos de viaje suelen ser muy similares. De esta manera, básicamente todas las líneas del sistema serán atractivas y pertenecerán al conjunto de líneas comunes. Llama la atención entonces que 67% de los individuos no considere líneas comunes, pues de dicha manera sus tiempos de espera (y por lo tanto sus tiempos totales de viaje) son mayores.

El 67% de los encuestados que no considera líneas comunes tienden a ser personas que no están familiarizadas con el sistema de transporte público o que no realizan el viaje regularmente (menos de una vez a la semana o que simplemente nunca lo han hecho) y por lo tanto no conocen otras líneas más allá de la escogida. En general el 33% restante que considera líneas comunes realiza el viaje varias veces por semana. De esta manera, el nivel de conocimiento del sistema de transporte público es tremendamente relevante.

La edad también parece ser un factor relevante: el 67% que no considera líneas comunes tiende a ser mayor que el 33% restante. Dentro de aquel 33% tienen a estar los menores de 30 años, posiblemente porque están más familiarizados con Transantiago (un sistema relativamente nuevo), mientras que los mayores de 30 años pueden ser más propensos a intentar replicar la manera en que viajaban en el sistema anterior a Transantiago.

El propósito del viaje es otro de los factores que puede afectar la selección de estrategias de viaje. Dentro del 33% que considera líneas comunes tienden a estar las personas que van al trabajo o a estudiar. Estas personas, teniendo restricciones de tiempo más estrictas (e.g. hora de llegada al destino), seguramente analizan mejor las alternativas de viaje. La reducción del tiempo de espera que conlleva el considerar líneas comunes resulta valiosa para estos individuos. En el 67% restante tienen a estar los viajes de ocio (de compras, recreacionales, por motivos personales, etc.), donde la restricción de tiempo es menos relevante.

Finalmente, el ingreso parece jugar un rol importante entre los individuos que consideran líneas comunes y aquellos que no. El 33% que considera líneas comunes posee un mayor ingreso promedio que el 67% restante. Si bien hay individuos de todos los niveles de ingresos en ambos grupos, aquellos con ingresos mensuales inferiores a \$300.000 tienden a estar en el 67% que no considera líneas comunes, los que poseen ingresos mensuales entre \$300.000 y \$600.000 se reparten entre ambos grupos, y los que poseen ingresos mensuales superiores a \$600.000 tienden a estar en el 33% que consideran líneas comunes. Esto puede interpretarse como un efecto del nivel de educación de los individuos: a mayor ingreso, mayor es el nivel educacional, de modo que mayor es la capacidad analítica para estudiar las alternativas de viaje (identificando un conjunto de líneas atractivas para reducir el tiempo total de viaje).

#### 4. MODELACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE ELECCIÓN DE RUTA

A partir de los resultados obtenidos en la Sección 3 y la relación entre las características socio-económicas de los individuos y sus estrategias de comportamiento, para modelar de mejor manera las elecciones de ruta dentro del sistema de transporte público de Santiago proponemos tratar las estrategias de comportamiento como una variable socio-económica más del individuo, la cual puede modelarse a partir de sus características individuales. Es importante notar que la estrategia de comportamiento debe ser modelada pues sólo se cuenta con información al respecto para el 49% de los viajeros. Para modelar la estrategia de comportamiento (considerar o no líneas comunes) utilizamos un modelo MNL, cuyas variables explicativas corresponden a las características socio-económicas de los individuos. Los resultados del modelo para modelar la probabilidad de que se consideren líneas comunes se presentan en la Tabla 3. Se puede apreciar que todas las variables socio-económicas resultan estadísticamente significativas para explicar las estrategias de comportamiento de los individuos.

TABLA 3: Resultados del Modelo de Estrategias de Comportamiento

Variable	Parámetro	Test-t
Viaje al menos semanal	1.322	4,98
Viaje al menos mensual	0.766	3,71
Viaje ocasional/nunca	0.000	Categoría base
Ingreso alto (más de \$600.000)	0.940	3,22
Ingreso medio (\$300.000 a \$600.000)	0.327	3,45
Ingreso bajo (menos de \$300.000)	0.000	Categoría base
Edad joven (menos de 30 años)	0.399	2,90
Edad adulto (más de 30 años)	0.000	Categoría base
Constante	- 2.051	- 5,76

Fuente: Elaboración propia

Los signos de los parámetros estimados son consistentes con los resultados presentados en la Sección 3. La probabilidad de considerar líneas comunes es mayor para aquellos usuarios que: (i) realizan el viaje más frecuentemente, (ii) poseen niveles de ingreso mayor, y (iii) son menores. El propósito del viaje resulta estar muy correlacionado con la frecuencia de realización del viaje, por lo que se ha omitido del modelo. A partir de los parámetros estimados es posible obtener la probabilidad de considerar líneas comunes para cada estrato de la población. Dichas probabilidades se presentan en la Tabla 4. Se aprecia una amplia gama de valores para las probabilidades, oscilando entre 11% y 65% según las características de los individuos.

TABLA 4: Probabilidades de Considerar Líneas Comunes

Viajes (frecuencia)	Categoría Socio-Económica		Edad	
	Ingreso	joven	adulto	
al menos semanal	alto	65 %	55 %	
al menos semanal	medio	50 %	40 %	
al menos semanal	bajo	42 %	33 %	
al menos mensual	alto	51 %	41 %	
al menos mensual	medio	36 %	28 %	
al menos mensual	bajo	29 %	22 %	
ocasional/nunca	alto	33 %	25 %	
ocasional/nunca	medio	21 %	15 %	
ocasional/nunca	bajo	16 %	11 %	

Fuente: Elaboración propia

En base a los datos obtenidos de la encuesta, se estimaron modelos de elección de modo/ruta para los viajeros encuestados. La información de los niveles de servicio se obtuvo directamente de datos proporcionados por Transantiago para caracterizar el tiempo de viaje y el tiempo de espera asociado a las distintas alternativas de modo/ruta. Adicionalmente se consideraron como variables explicativas la tarifa, el tiempo de caminata (al transbordar) y la cantidad de transbordos.

Es importante notar que, dado el esquema tarifario del sistema de transporte urbano de Santiago, la tarifa asociada a cada alternativa de modo/ruta dependerá únicamente de la elección de Metro para al menos una etapa del viaje (usar Metro implica un costo adicional de \$80 en hora punta y \$20 en fuera de punta). El tiempo de espera considerado abarca la espera inicial en Plaza Maipú y todas las posibles esperas adicionales al transbordar.

El enfoque de modelación utilizado es secuencial: cada individuo de la muestra posee una probabilidad de considerar o no líneas comunes, y luego una probabilidad condicionada de escoger cada alternativa disponible dependiendo de la estrategia en particular. Bajo el enfoque de Itinerarios Mínimos, para aquellos que no consideran líneas comunes las alternativas consisten de itinerarios, mientras que bajo el enfoque de Rutas Mínimas, para aquellos que consideran líneas comunes las alternativas consisten de rutas. Dada la baja proporción de usuarios que consideraban Estrategias Mínimas en la base de datos, dicho enfoque se omitió en la modelación a fin de evitar sesgos.

Consideramos una función de utilidad de lineal  $V_{iq}$  para cada alternativa  $i$ , dada por la expresión (6), compuesta de los atributos antes descritos. Los parámetros del modelo se distinguen por tipo de usuario  $q$ : aquellos que consideran líneas comunes y aquellos que no. Si bien es posible que otros aspectos influyen las decisiones de los individuos (Raveau *et al.*, 2010), la especificación considerada de la función de utilidad representa una aproximación robusta del comportamiento general de los usuarios de Transantiago.

$$V_{iq} = \theta_{tar}^q \cdot \text{tarifa}_i^q + \theta_{via}^q \cdot T_{viaje\ i}^q + \theta_{esp}^q \cdot T_{espera\ i}^q + \theta_{cam}^q \cdot T_{caminata\ i}^q + \theta_{tra}^q \cdot \text{transbordos}_i^q \tag{6}$$

Los resultados de la estimación del modelo Logit Multinomial para la elección de modo/ruta considerando las cinco variables mencionadas se presentan en la Tabla 5. Se aprecia que todas las variables poseen el signo esperado (negativo, pues representan una desutilidad) y resultan estadísticamente significativas al 95% de confianza. De igual manera, se aprecian diferencias entre los parámetros de los individuos que consideran líneas comunes y aquellos que no. Estas diferencias respaldan el hecho que existen distintos perfiles de comportamiento dentro de los individuos, de modo que es necesario realizar una distinción entre ambos tipos de viajeros.

**TABLA 5: Resultados del Modelo de Elección de Modo / Ruta**

Variable	Individuos que Consideran Líneas Comunes		Individuos que No Consideran Líneas Comunes	
	Parámetro	Test-t	Parámetro	Test-t
Tarifa (CLP)	- 0,042	- 2,33	- 0,050	- 2,45
Tiempo de Viaje (min)	- 0,623	- 2,17	- 0,479	- 2,39
Tiempo de Espera (min)	- 1,598	- 4,35	- 1,217	- 3,77
Tiempo de Caminata (min)	- 1,849	- 2,11	- 1,349	- 2,43
Transbordos	- 2,585	- 2,45	- 1,569	- 1,98

Fuente: Elaboración propia

A partir de las estimaciones obtenidas, es posible computar valoraciones monetarias tasas marginales de sustitución para las variables de tiempo y transbordos, las que se presentan en la Tabla 6.

Se aprecia que los individuos que consideran líneas comunes poseen valoraciones monetarias mayores que los individuos que no consideran líneas comunes para todas las variables (debido al efecto del ingreso). En particular, los usuarios que consideran líneas comunes valoran el doble los transbordos.

Respecto de las tasas marginales de sustitución temporales, se aprecia que no varían demasiado entre ambos tipos de individuos. Por lo tanto, si bien las valoraciones monetarias de las componentes temporales difieren, las razones entre ellas permanecen relativamente constantes. Si existen diferencias entre las tasas marginales de los transbordos respecto al tiempo de viaje.

**TABLA 6: Valoraciones Subjetivas y Tasas Marginales de Sustitución**

Variable	Individuos que Consideran Líneas Comunes	Individuos que No Consideran Líneas Comunes
	<b>Valoración Monetaria</b>	
Tiempo de Viaje	\$ 890 por hora	\$ 574 por hora
Tiempo de Espera	\$ 2.282 por hora	\$ 1.460 por hora
Tiempo de Caminata	\$ 2.641 por hora	\$ 1.619 por hora
Transbordos	\$ 62 por transbordo	\$ 31 por transbordo
<b>Tasa Marginal Respecto al Tiempo de Viaje</b>		
Tiempo de Espera (min)	2,56 min de viaje	2,54 min de viaje
Tiempo de Caminata (min)	2,97 min de viaje	2,82 min de viaje
Transbordos	4,15 min de viaje	3,28 min de viaje

Fuente: Elaboración propia

## 5. CONCLUSIONES

En el presente estudio se han analizado las estrategias de elección de ruta de usuarios del sistema de transporte público de Santiago, a fin de contrastar las hipótesis metodológicas tradicionalmente utilizadas con el comportamiento efectivo de los viajeros. Si bien en la literatura se suele asumir que los viajeros se comportan de acuerdo a un enfoque de Estrategias Mínimas, la evidencia empírica indica que en la base de datos recolectada sólo 4% de los encuestados se comportaba de esta manera. Adicionalmente, el 67% no tomaba en consideración siquiera el concepto de líneas comunes. De esta manera, al menos para el caso de Santiago, seleccionar una única estrategia de comportamiento para modelar las decisiones de los individuos parece ser un enfoque errado, en especial cuando dicha estrategia suele ser de Estrategias Mínimas.

El análisis realizado muestra una alta relación entre la estrategia de comportamiento de los individuos y sus características socio-económicas. Es por esto que proponemos tratar las estrategias de comportamiento como una característica individual de los viajeros, dependiente de sus características socio-económicas (en particular la frecuencia del viaje, edad, ingreso). De esta manera el modelo de elección de ruta es capaz de replicar distintas estrategias presentes dentro de la población.

Finalmente, al distinguir entre tipos de usuario según sus estrategias de comportamiento es posible identificar diferencias sustanciales en los resultados de la modelación de las elecciones de modo/ruta dentro del sistema de transporte público urbano. En particular, pueden existir diferencias importantes en las valoraciones subjetivas de los atributos y sus tasas marginales. Por lo tanto, omitir las diferencias en las estrategias de comportamiento dentro de la población puede conllevar a sesgos en la estimación.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido realizado financiado por el proyecto Fondecyt 1110720: Planning and analysis of express services for an integrated public transport system y el proyecto FONDEF D10I1049: Una herramienta táctico- estratégica de gestión y planificación de sistemas de transporte público urbano.

## REFERENCIAS

Chriqui, C., y P. Robillard (1975) Common bus lines. **Transportation Science**, 9(2), 115-121.

de Cea, J., y J.E. Fernández (1993) Transit assignment for congested public transport systems: an equilibrium model. **Transportation Science**, 27(2), 133-147.

Lam, W.H.K., Z.Y., Gao, K.S. Chan y H. Yang (1999) A stochastic user equilibrium assignment model for congested transit networks. **Transportation Research Part B**, 33(5), 351-368.

McFadden, D. (1974) Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior. En Zarembka, P. (ed.), **Frontiers of Econometrics**. Academic Press, New York, USA, 105-142.

Nguyen, S., y S. Pallottino (1988) Equilibrium traffic assignment for large scale transit networks. **European Journal of Operational Research**, 37(2), 176-186.

Prato, C. G. (2009). Route choice modeling: past, present and future research directions. **Journal of Choice Modelling**, 2, 65–100.

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.

Shimamoto, H., F. Kurauch, J.D. Schmöcker y M.G. Bell (2010) Transit Assignment Model Considering the Correlation of Vehicles' Arrival. **Proceedings of the Transportation Research Board 89th Annual Meeting**, No. 10-2016.

Spiess, H., y M. Florian (1989) Optimal strategies: a new assignment model for transit networks. **Transportation Research Part B**, 23(2), 83-102.

Ziliaskopoulos, A., y W. Wardell (2000) An intermodal optimum path algorithm for multimodal networks with dynamic arc travel times and switching delays. **European Journal of Operational Research**, 125(3), 486-502.