

Modelación y Análisis Temporal de Elección de Ruta en Metro

Sebastián Raveau
Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística
Pontificia Universidad Católica de Chile
sraveau@puc.cl

Juan Carlos Muñoz
Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística
Pontificia Universidad Católica de Chile
jcm@ing.puc.cl

Louis de Grange
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Diego Portales
louis.degrange@udp.cl

RESUMEN

En este trabajo presentamos modelos de elección de ruta para una red de Metro para distintos períodos temporales, incorporando variables asociadas a la topología de la red, aspecto que complementa los tradicionales modelos de elección de ruta que normalmente se basan en los niveles de servicio (tiempo de viaje, costo, transbordos, etc.) y en características socioeconómicas y demográficas de los viajeros (nivel de ingreso, propósito de viaje, etc.). Las nuevas variables topológicas, que representan conceptos como cuán directa es la ruta escogida y el nivel de conocimiento de la red por parte de los viajeros, corresponden a información endógena a la modelación, y para cuantificarlas no se requiere información adicional a la que normalmente se requiere en la construcción de este tipo de modelos; esto facilita su uso en fase predictiva. De igual manera, se consideran variables relativas a la comodidad durante el viaje, tales como densidades de pasajeros y características físicas de las estaciones. Concluimos que estas nuevas variables, junto con el correcto tratamiento temporal del proceso de toma de decisiones, pueden mejorar significativamente la capacidad explicativa y predictiva de los modelos de elección de ruta en redes de transporte urbano.

Palabras claves: Elección de Ruta, Períodos Temporales, Topología de la Red, Costo Angular, Percepciones, Especificación de Modelos.

Palabras: 5.905

ABSTRACT

In this study we present route choice models for a Metro network for different time periods, considering variables related to the topology of the network. These variables complement traditional route choice models, which are usually based on levels of service (travel time, fare, transfers, among others) and on the travelers' socio-demographic characteristics (such as income level and purpose of the trip). The new topological variables, which represent concepts such as how direct the chosen route is and how well known the route are, are endogenous to the modeling. To quantify the new topological variables no additional information (to the one required for these type of models) is required, which eases their use when forecasting. Additionally, we consider variables related to the comfort during the trip, such as trains' occupancy and physical characteristics of the stations. We conclude that these new variables, when the temporal effect of

decisions is correctly addressed, can substantially improve the explanatory and forecasting capacities of route choice models on urban transportation networks.

Keywords: Route Choice, Time Periods, Network Topology, Angular Cost, Perceptions, Model Specification.

1. INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de este trabajo es mejorar nuestra comprensión del comportamiento de los usuarios al momento de elegir rutas de viaje dentro de una determinada red de transporte. Interesa cuantificar el impacto de diferentes factores subyacentes que influyen sus decisiones para distintos períodos del día, y mejorar la inferencia estadística y capacidad predictiva de los modelos de elección de ruta.

Los factores que influyen en la elección de ruta, y que normalmente son incluidos en los modelos, se relacionan con los niveles de servicio de las distintas rutas alternativas (e.g. tiempo de viaje, tiempo de espera, caminata, trasbordos, tarifas, densidad de pasajeros por tren, etc.) y con las características socioeconómicas y demográficas de los individuos (nivel de ingreso, propósito del viaje, etc.; Ortúzar y Willumsen, 2011). En la literatura especializada existen múltiples modelos de elección de ruta basados en los atributos percibidos por los viajeros y en sus características socioeconómicas y demográficas (Dial, 1971; Daganzo y Sheffi, 1977; Bell, 1995; Ramming, 2001; Prashker y Bekhor, 2004), tal que los usuarios se comportan de acuerdo a sus costos percibidos; sin embargo, estos modelos sólo consideran algunos atributos tangibles (i.e. fácilmente medibles) en su formulación.

Sin embargo, pueden existir factores adicionales que sean relevantes dentro del proceso de elección de ruta de los viajeros, que no son habitualmente incorporados en la modelación, tales como la estética, la comodidad y la confiabilidad en el tiempo de viaje (ver Papinski *et al.*, 2009). La dificultad de su incorporación en la modelación de elección de ruta radica en (i) su subjetividad, pues distintas personas los perciben distinto, y (ii) su intangibilidad, al no poseer escala de medición. Si bien existen avances para su incorporación en modelos de elección de modo de transporte (Ben-Akiva *et al.*, 2002; Raveau *et al.*, 2010), sus aplicaciones al contexto de elección de ruta son limitadas (Prato *et al.*, 2009).

Raveau *et al.* (2011) proponen un modelo de elección discreta que complementa variables tradicionales en la modelación de elección de ruta (e.g. tiempo de viaje, tiempo de espera, cantidad de transbordos) con variables relacionadas con las características físicas de las estaciones y vehículos (e.g. porcentaje medio de ocupación, tiempo de caminata al transbordar, disponibilidad de escalera mecánica en las estaciones) y variables relacionadas con la topología de la red (e.g. medida angular relacionada a qué tan directas son las rutas, geometría de las rutas).

Dentro de los problemas que presenta la modelación realizada por Raveau *et al.* (2011) es posible mencionar tres aspectos: (i) no consideran variables socioeconómicas en la modelación, a fin de distinguir entre distintos tipos de viajeros, (ii) no tratan la correlación de alternativas producto de la superposición de rutas (ver Prato, 2009), y (iii) no abordan las diferencias existentes en la elección de ruta para los distintos periodos del día (esto es, punta mañana, fuera de punta y punta tarde). El presente estudio busca solucionar estos problemas.

El modelo de elección de ruta planteado corresponde a un modelo de tipo C-Logit (Cascetta *et al.*, 1996), pero que incorpora explícitamente estas nuevas variables explicativas, de manera adicional a las variables tradicionalmente utilizadas. Este nuevo modelo fue calibrado con datos correspondientes a la red de Metro de Santiago de Chile, y se compara con un modelo base que sólo incluye variables explicativas tradicionales. Concluimos que estas nuevas variables pueden mejorar significativamente la capacidad explicativa y predictiva de los procesos de elección de ruta en redes de transporte.

2. ESPECIFICACIÓN DEL MODELO

Nuestro análisis empírico consiste en analizar la elección de ruta de los usuarios de la red de Metro de Santiago, en Chile (i.e. la elección de los puntos de transbordo sucesivos entre origen y destino). En esta red existen diversos pares origen-destino que poseen más de una posible ruta factible de ser utilizada (ver Figura 1a). Se consideraron para el análisis los viajes en tres periodos: (i) punta mañana (7:00 hrs – 9:00 hrs), (ii) fuera de punta (11:00 hrs – 14:00 hrs. y 16:00 hrs – 18:00 hrs.), y (iii) punta tarde (18:00 hrs – 20:00 hrs). Estos periodos son los que emplea Metro de Santiago para la evaluación de sus planes operacionales. En dichos periodos se observan cerca de 1.300.000 viajes en la red de Metro, de los cuales un 51% consideran transbordos.

La información de los viajes se obtuvo de la aplicación de una encuesta origen-destino en la red de Metro realizada en el mes de octubre del año 2008. En dicha encuesta se obtuvieron las rutas de viajes realizados por 166.700 individuos (i.e. cerca del 13% del total de usuarios). Al momento de realizar la encuesta, la red de Metro de Santiago contaba con 5 líneas y 85 estaciones, 7 de las cuales son estaciones de transbordo. Del total de 7.140 pares origen-destino de estaciones dentro de la red, en 4.985 (i.e. 70%) es necesario realizar transbordos. De ellos, en 1.365 existe más de una ruta razonable para realizar el viaje. En nuestro caso se utilizó como criterio de razonabilidad de una ruta el que existiera al menos un viajero que la hubiera utilizado en nuestra base de datos.

La muestra que alimentará nuestros modelos comprende sólo los viajes en estos 1.365 pares que corresponde a 28.961 observaciones (equivalente al 40% del total de individuos que transbordan). En la Tabla 1 se presenta una descomposición de estos pares origen destino y sus viajes asociados respecto del número de rutas disponibles para realizarlos.

Si bien en la mayoría de los casos dicha elección se realiza entre dos rutas alternativas, existen pares de estaciones entre las que existen 3 y hasta 4 rutas alternativas que fueron utilizadas por individuos de la encuesta.

Es razonable suponer que en redes más densas la cantidad de pares origen-destino con varias rutas alternativas sea mayor.

TABLA 1: Información de la Muestra de Viajes y sus Pares Origen-Destino Asociados

Alternativas Disponibles	% de Pares OD	% de Viajes
2 rutas observadas	97 %	92 %
3 rutas observadas	3 %	8 %
4 rutas observadas	< 1 %	< 1 %

En el modelo que presentaremos la topología de la red es una variable relevante. La Figura 1a presenta la red de Metro de Santiago, considerando la topología real de sus estaciones y líneas (información georeferenciada), mientras que en la Figura 1b se aprecia el mapa que Metro disponía en 2008 a los usuarios en todas las estaciones del sistema. Es posible notar las distorsiones del mapa de las Figura 1b (tanto en la ubicación de las estaciones como en la distancia entre ellas), generando diferentes percepciones angulares y geométricas, que pueden inducir a los usuarios a elegir rutas que no sean las más adecuadas o de menor costo total.

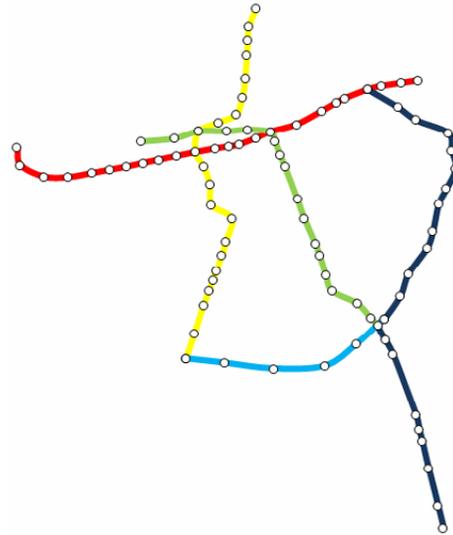


FIGURA 1a: Mapa Real de la Red de Metro de Santiago

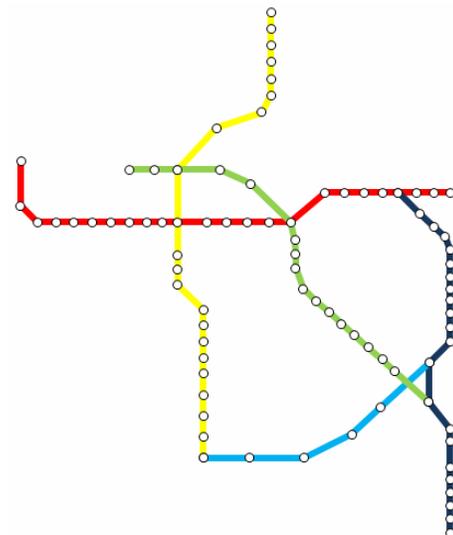


FIGURA 1b: Mapa de Información de la Red de Metro

2.1 Descripción General del Modelo

El modelo de elección de ruta utilizado corresponde a un modelo del tipo C-Logit y mantiene una estructura similar a la presentada en Raveau *et al.* (2011). En ella la función de utilidad de los viajeros está compuesta por variables explicativas tradicionales asociadas a los niveles de servicio de la red y variables socioeconómicas, además de las nuevas variables explicativas asociadas a las características físicas y a la topología de la red. La tarifa no se incluyó ya que el Metro de Santiago opera con tarifa plana. El detalle de las variables explicativas se expone en la sección siguiente.

Este modelo se comparó con un modelo restringido o anidado que incluía sólo las variables asociadas a niveles de servicio de la red tradicionalmente incluidas en este tipo de modelos (tiempo de viaje, tiempo de espera y cantidad de transbordos). Adicionalmente se comparó la especificación de los modelos para los distintos periodos del día. La estimación de parámetros se efectuó mediante el método de máxima verosimilitud.

2.2 Variables Explicativas del Modelo

Las variables explicativas básicas del modelo son aquéllas que estarían presentes en cualquier modelo tradicional de elección de ruta. En este sentido, se consideró el tiempo de viaje en vehículo de los individuos desde su origen hasta su destino, y su tiempo total de espera (tanto en su origen como en todas sus estaciones de cada ruta alternativa como un indicador del tiempo adicional y del desagrado que implica cambiar de línea.

Adicionalmente, y con el objetivo de explicar de mejor manera los transbordos entre líneas, se incluyeron nuevas variables asociadas al tipo y a las condiciones de los transbordos. De esta forma, se incluyó como variable explicativa el tiempo de caminata entre los andenes de las líneas asociadas a cada transbordo. Esto exigió un catastro físico que también requirió identificar aquellas estaciones de transbordo que cuentan con escaleras mecánicas, y aquéllas en que el transbordo se realiza en subida.

Por otra parte, se dispone de información detallada de los perfiles de carga en cada línea de Metro para cada periodo del día, por lo que fue posible definir la variable explicativa “porcentaje medio de ocupación en las rutas”. Esta variable consiste en el promedio, ponderado según distancias, de los niveles de ocupación (i.e. la razón entre la carga y la capacidad) de los arcos que componen las rutas alternativas. El rango teórico de esta variable va entre 0 (i.e. ruta en que el tren va vacío en todo sus arcos) y 1 (i.e. ruta en que el tren va a capacidad en todos sus arcos).

Esta variable tiene valor en sí misma pues refleja el nivel de confort experimentado por el usuario durante su viaje, pero también debiese ser indicativa de dos aspectos que influyen en el nivel de servicio percibido por el usuario: la posibilidad de obtener un asiento en el tren y la posibilidad de no subir al tren y tener que esperar al siguiente. Así, se consideraron dos variables relacionadas con valores extremos de la ocupación de los trenes en las estaciones de origen y de transbordos. Si el porcentaje de esta ocupación en dichas estaciones está por debajo de un umbral de ocupación reducido, se asume que el usuario tiene posibilidad de conseguir asiento y si la ocupación supera un segundo umbral elevado se asume que el usuario arriesga no poder subir al primer tren. Para definir estos umbrales se ajusta los modelos a aquellos valores que ofrezcan una mejor calibración. En este caso el mejor

ajuste se obtuvo para 15% y 85% respectivamente lo que no sólo representan indicadores razonables sino que además son consistentes con el modelo planteado en Raveau *et al.* (2011).

Respecto al nivel de conocimiento de la red o de las distintas rutas existentes, en el caso del Metro de Santiago ocurre que las diversas líneas fueron construidas en épocas diferentes (la más antigua fue inaugurada en 1975, mientras que la más reciente en 2006), por lo que los pasajeros están más familiarizados con aquéllas que conocen más, y suelen tender a preferirlas. Del mismo modo, si más usuarios utilizan una determinada línea, la probabilidad de que dicha línea sea más conocida que las otras es mayor. Luego, para incorporar este efecto, se definió una proxy de la variable de conocimiento de la red, que consistió simplemente en el volumen promedio de pasajeros de cada ruta, durante el periodo modelado. De igual manera, se consideró una variable dicotómica de antigüedad de la ruta, que toma el valor 1 si la ruta tiene diez o menos años de antigüedad. El umbral de diez años corresponde a la construcción de las líneas 4 y 4A de la red de Metro de Santiago.

Por otra parte, se presume que los usuarios tienden a preferir aquellas rutas que son más directas entre su origen y destino; asimismo, se desea evaluar los eventuales efectos de las distorsiones con que la información geográfica les es presentada (e.g. diferentes tipos de mapas de la misma red). Para modelar estos efectos, se definió para cada ruta un indicador de penalidad denominado costo angular (Montello, 1991; Turner, 2001; Conroy-Dalton, 2003; Raveau *et al.*, 2011). A este indicador se le exigen las siguientes tres características:

- La penalidad debe ser mínima si el tramo de la ruta va directamente al destino final del viaje (i.e. un ángulo de 0°), y máxima si va en dirección opuesta (i.e. un ángulo de 180°).
- Cambios marginales en torno a los valores extremos (0° y 180°) deben presentar una variación pequeña en la penalización, y que el mayor efecto se produzca en el punto en que el tramo de la ruta se acerque o se aleje del destino (esto ocurre cuando el ángulo es de 90°).
- La penalización debe ser angularmente simétrica en el sentido que, por ejemplo, un tramo que presente un ángulo de 15° respecto al punto de destino se penalice de la misma forma que un ángulo de 345° .

Una función de penalización que cumple con estas tres características es $\text{sen}(\theta/2)$, donde θ es el ángulo que se produce entre la línea recta que va desde el inicio del tramo de la ruta hasta el destino final del viaje, y la línea recta formada por el tramo mismo de la ruta (Raveau *et al.*, 2011). En la Figura 2 se presenta un ejemplo de cómo estimar el costo angular. La penalidad angular se pondera por la distancia del tramo, pues no sólo interesa saber si alguna etapa de la ruta desvía al usuario, sino también saber cuánto lo mueve en esa dirección. Notar que el costo angular que se desprende de las distintas rutas en la figura 1a es diferente del que se desprende para ellas en la figura 1b. Así, este efecto se puede probar separadamente para cada una de estas dos redes.

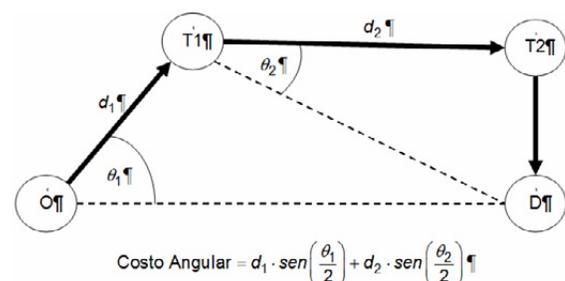


FIGURA 2: Costo Angular

También relacionado con la topología de la red y familiarizado con el concepto de costo angular, se consideró la incorporación de dos indicadores acerca de la geometría de las rutas disponibles para cada par origen-destino, definidos inicialmente por Dial (1971). Se distingue a aquellas rutas que poseen alguna estación de transbordo (o en su defecto, la estación de destino) más cercana al origen que la inmediatamente anterior, dando la impresión de acercarse al origen, y a aquellas rutas que poseen alguna estación de transbordo más lejana al destino que la inmediatamente anterior, dando la impresión de alejarse del destino. Este fenómeno se incorporó mediante variables binarias (“me alejo del destino” y/o “me acerco al origen”).

Para tratar la correlación de alternativas producto de la superposición de rutas (ver Prato, 2009) se definió un factor de similitud (FS) (Cascetta *et al.*, 1996) para corregir las proporciones de elección de aquellas rutas que comparten parte importante de sus tramos con otras alternativas. La definición del factor de similitud para cada ruta i , FS_i , corresponde a aquella planteada inicialmente por Cascetta (2001) Adicionalmente se define L_a como el largo del tramo a , L_i como el largo de la ruta i y δ_{aj} vale 1 si el tramo a es parte de la ruta j y 0 en caso contrario. El factor de similitud queda descrito del siguiente modo:

$$FS_i = \ln \sum_{a \in i} \left(\frac{L_a}{L_i} \cdot \sum_j \delta_{aj} \right)$$

Finalmente, se consideraron características socioeconómicas de los individuos con el objeto de realizar variaciones sistemáticas en la percepción de algunas de las variables antes mencionadas. En particular, se consideró el propósito del viaje, la edad y género del encuestado. Estas variables permiten tratar la heterogeneidad de la población, entender de mejor manera el proceso de toma de decisiones de los individuos y evaluar con mayor profundidad los impactos de proyectos y políticas de transporte.

3. RESULTADOS DEL MODELO

La Tabla 2 presenta Los resultados de las estimaciones de elección de ruta considerando las variables explicativas descritas anteriormente. La Tabla presenta para cada uno de los tres periodos del día tanto el modelo base de comparación como el modelo propuesto con el conjunto completo de variables. Junto a cada parámetro se indica su test- t .

Es posible apreciar que todos los parámetros poseen el signo teóricamente correcto y son, en general, estadísticamente significativos al 95%.

Respecto a la especificación del costo angular y de las variables asociadas a acercarse al origen o alejarse del destino, están fueron especificadas utilizando las distancias del mapa de las estaciones de Metro (i.e. distancias distorsionadas, ver figura 1b) en lugar del mapa real (figura 1a), debido a que de esa manera presentaban mejor ajuste estadístico. Este resultado es consistente con aquellos obtenidos por Raveau *et al.* (2011), quedando en evidencia la importancia que tiene la manera en que la información le es proporcionada a los usuarios, pues las distorsiones en el mapa inducen a los usuarios a preferir ciertas rutas por sobre otras.

A partir de los resultados expuestos en la Tabla 2, es posible afirmar que las variables explicativas tradicionales (tiempo de viaje, tiempo de espera y número de trasbordos), si bien son relevantes (el tiempo de viaje resulta ser la variable con mayor significancia estadística), no son capaces de explicar el proceso de toma de decisiones por completo; es más, la ausencia de información relevante puede sesgar la estimación de sus parámetros (notar la diferencia que se produce en la estimación del parámetro del tiempo de espera, especialmente en el período fuera de punta). De este modo, es necesaria la inclusión de variables adicionales que usualmente suelen obviarse, en particular información proveniente de la topología de la red, la cual es de fácil obtención.

Tal como se observa en la Tabla 2, los parámetros de los modelos base para ambos periodos punta resultan estadísticamente iguales; el modelo base para fuera de punta se distingue en los parámetros para tiempo de espera y número de trasbordos. En los modelos propuestos para los periodos punta sólo resultan estadísticamente iguales los parámetros de tiempo de viaje y número de trasbordos; mientras que el tiempo de espera resulta estadísticamente igual en punta tarde y fuera de punta.

Dentro de los modelos propuestos, la variación sistemática entre edad (“mayores de 60 años”) y antigüedad de la ruta sólo resulta significativa en fuera de punta, posiblemente porque en dicho período viaja la mayor proporción de gente mayor. El factor de similitud sólo resulta significativo en el periodo punta tarde, lo que es señal de diferencias en la forma en que los usuarios perciben las rutas similares a lo largo del día.

TABLA 2: Resultados de la Estimación de Modelos de Elección de Ruta

Variable	Punta Mañana		Punta Tarde		Fuera de Punta	
	Modelo Base	Modelo Propuesto	Modelo Base	Modelo Propuesto	Modelo Base	Modelo Propuesto
Tiempo de viaje	-0,121 (-12,55)	-0,150 (-9,45)	-0,121 (-12,55)	-0,150 (-9,45)	-0,121 (-12,55)	-0,083 (-3,04)
Trabajo o estudio	-0,036 (-43,51)	-0,032 (-2,00)	-0,036 (-43,51)	-0,032 (-2,00)	-0,036 (-43,51)	-0,027 (-1,71)
Tiempo de espera	-0,308 (-42,81)	-0,243 (-2,92)	-0,308 (-42,81)	-0,217 (-2,60)	-0,600 (-32,31)	-0,217 (-2,60)
Tiempo de caminata	-	-0,265 (-4,20)	-	-0,279 (-4,42)	-	-0,298 (-4,57)
Mujer	-	-0,064 (-1,94)	-	-0,067 (-2,04)	-	-0,069 (-2,08)
Número de trasbordos	-1,001 (-47,52)	-0,311 (-3,89)	-1,001 (-47,52)	-0,311 (-3,89)	-0,663 (-38,63)	-0,422 (-4,33)
Transbordo en subida	-	-0,370 (-2,35)	-	-0,407 (-2,59)	-	-0,467 (-2,90)
Sin escalera mecánica	-	-0,506 (-5,52)	-	-0,665 (-7,09)	-	-0,723 (-7,17)
Costo angular	-	-0,078 (-5,92)	-	-0,044 (-3,03)	-	-0,031 (-1,85)
Alejarse del destino	-	-0,923 (-8,52)	-	-0,473 (-3,68)	-	-0,399 (-2,62)
Acercarse al origen	-	-0,583 (-5,43)	-	-0,725 (-6,45)	-	-0,774 (-6,80)
Ruta con 10 o menos años	-	-0,403 (-3,10)	-	-0,212 (-2,46)	-	-0,202 (-1,27)
Mayores de 60 años	-	-	-	-	-	-0,556 (-3,82)
Conocimiento de la red	-	0,084 (-6,25)	-	0,049 (-3,35)	-	0,025 (-1,24)
% medio de ocupación	-	-1,887 (-7,91)	-	-2,261 (-9,15)	-	-3,021 (-7,25)
Probabilidad de sentarse	-	0,219 (-5,62)	-	0,219 (-5,62)	-	0,241 (-5,99)
Probabilidad de no subir	-	-0,266 (-1,87)	-	-0,546 (-3,18)	-	-
Factor de similitud	-	-	-	-0,572 (-5,47)	-	-
Tamaño muestral	7.417	7.417	8.612	8.612	12.932	12.932
Log-verosimilitud	-3.598	-3.449	-3.794	-3.584	-6.153	-5.893
ρ^2 ajustado	0,318	0,346	0,392	0,425	0,341	0,368

Respecto del ajuste de los modelos, el modelo propuesto logra en los tres casos una mejora significativa en términos de log-verosimilitud: 149 puntos en punta mañana, 210 en punta tarde y 260 puntos en fuera de punta. De esta manera, se rechazaría la hipótesis nula de que ambas especificaciones son equivalentes, pues los valores χ^2 al 99% de confiabilidad son: 26,2 para punta mañana; 27,7 para punta tarde y 26,2 para fuera de punta.

En la Tabla 3 se presenta el error cuadrático medio de ambos modelos para cada período del día; se aprecia que el modelo propuesto resulta superior en términos predictivos al modelo base. El error de predicción para ambos modelos crece a medida que aumenta la cantidad de rutas alternativas, sin embargo las diferencias entre el modelo propuesto y el modelo base resultan también mayores.

TABLA 3: Error Cuadrático Medio de Predicción

Pares OD	Punta Mañana		Punta Tarde		Fuera de Punta	
	Base	Propuesto	Base	Propuesto	Base	Propuesto
	Todos	14,63	10,33	7,91	5,77	8,21
2 rutas	13,89	9,92	7,00	5,22	7,75	5,15
3 ó 4 rutas	27,20	15,96	19,47	13,69	14,50	9,06

Notar que si bien no es posible obtener valoraciones monetarias para los atributos considerados (e.g. valor subjetivo del tiempo de viaje), dado que no se incorporó una variable de costo en la función de utilidad, sí es posible obtener tasas marginales de sustitución entre los distintos tiempos involucrados, considerando como base el tiempo de viaje en vehículo. Estas valoraciones se presentan en la Tabla 4 para los distintos modelos y combinaciones de variables socioeconómicas.

Se aprecia que en los modelos base se sobreestima la valoración del tiempo de espera, debido a que el modelo no considera explícitamente el tiempo de caminata. Así, ante la ausencia del tiempo de caminata, el tiempo de espera contiene parte de la información de la caminata (variables correlacionadas, ya que para el caso de estudio ambos están directamente asociados al hecho de transbordar, lo que aumenta simultáneamente el tiempo de caminata y el tiempo de espera). En consecuencia, los parámetros de los modelos base están sesgados producto de la omisión de variables relevantes que sí fueron incorporadas en los modelos propuestos.

TABLA 4: Tasas Marginales de Sustitución Temporales

Tiempo	Propósito = Trabajo o Estudio					
	Punta Mañana		Punta Tarde		Fuera de Punta	
	Base	Propuesto	Base	Tiempo	Base	Propuesto
Viaje	1,00 (base)	1,00 (base)	1,00 (base)	1,00 (base)	1,00 (base)	1,00 (base)
Espera	1,96	1,34	1,96	1,20	3,82	1,97
Caminata ♂	-	1,46	-	1,54	-	2,70
Caminata ♀	-	1,81	-	1,91	-	3,33
Tiempo	Propósito = Otros					
	Punta Mañana		Punta Tarde		Fuera de Punta	
	Base	Propuesto	Base	Tiempo	Base	Propuesto
Viaje	1,00 (base)	1,00 (base)	1,00 (base)	1,00 (base)	1,00 (base)	1,00 (base)
Espera	2,55	1,62	2,55	1,45	4,96	2,62
Caminata ♂	-	1,77	-	1,86	-	4,58
Caminata ♀	-	2,19	-	2,31	-	4,41

La desagregación de las componentes asociadas a transbordar permite obtener diferentes valoraciones que dependen de las estaciones de transbordo. Mientras a partir de los modelos

base sólo es posible obtener una valoración única equivalente por transbordo, los modelos propuestos son capaces de distinguir la valoración asignada a caminar entre andenes (Tabla 4) y la valoración asociada a las características o atributos de cada estación de transbordo, que se señalan en la Tabla 5. Dichas valoraciones pueden ser interpretadas como el tiempo adicional que los usuarios están dispuestos a viajar para evitar el transbordo, por ejemplo en la punta tarde los usuarios con propósito trabajo están dispuestos a viajar $1,71 + 2,24 + 3,66 - 1,21 = 6,40$ minutos adicionales para evitar un transbordo en subida y sin escalera mecánica, en el cual existe la posibilidad de sentarse.

TABLA 5: Valoraciones por Tipo de Transbordo (en minutos de tiempo de viaje)

Transbordo	Propósito = Trabajo o Estudio					
	Punta Mañana		Punta Tarde		Fuera de Punta	
	Base	Propuesto	Base	Tiempo	Base	Propuesto
Base	6,38	1,71	6,38	1,71	4,22	3,84
Sentarse	-	- 1,21	-	- 1,21	-	- 2,18
No Subir	-	1,46	-	3,01	-	-
Esc. Mecánica	-	2,79	-	3,66	-	6,57
Subida	-	2,04	-	2,24	-	4,24
Transbordo	Propósito = Otros					
	Punta Mañana		Punta Tarde		Fuera de Punta	
	Base	Propuesto	Base	Tiempo	Base	Propuesto
Base	8,27	2,07	8,27	2,07	5,48	5,09
Sentarse	-	- 1,46	-	- 1,46	-	- 2,90
No Subir	-	1,77	-	3,64	-	-
Esc. Mecánica	-	3,37	-	3,37	-	8,70
Subida	-	2,46	-	2,46	-	5,62

Resulta de interés analizar cómo cambia la valoración de las distintas variables explicativas para los distintos períodos del día. En la Tabla 6 se presentan las valoraciones relativas entre punta mañana (PM), punta tarde (PT) y fuera de punta (FDP). Se aprecia que en todos los casos, la valoración de punta tarde se encuentra entre las valoraciones de punta mañana y fuera de punta. El tiempo de viaje y espera se valora más en los períodos punta, pero el tiempo de caminata se valora más en el período fuera de punta. Las personas no sólo están más dispuestas a transbordar en los períodos punta, sino también a hacerlo en peores condiciones (en subida y/o sin escalera mecánica). La valoración del costo angular resulta menor en el período fuera de punta, lo que es señal de que los usuarios están más dispuestos a desviarse de la ruta más directa para acceder a alternativas más cómodas.

4. CONCLUSIONES

Si bien en la modelación de elección de ruta se suelen considerar sólo variables explicativas tangibles, las percepciones que tienen los usuarios de las distintas alternativas disponibles hacen que no siempre elijan aquélla de “menor costo” a ojos del modelador. En este trabajo se ha demostrado y cuantificado la influencia de otros factores asociados al proceso de toma de decisiones de los individuos a lo largo del día. De igual manera, la caracterización de las condiciones del entorno del viaje (e.g. densidades y características físicas de las estaciones) resulta beneficiosa.

TABLA 6: Valoraciones Relativas entre Periodos

Variable	PT / PM	FDP / PM	FDP / PT	Relación
Tiempo de viaje	1,00 *	0,55	0,55	PM = PT > FDP
Trabajo o estudio	1,00 *	0,61	0,61	PM = PT > FDP
Tiempo de espera	0,89	0,89	1,00 *	PM > PT = FDP
Tiempo de caminata	1,05	1,12	1,07	PM < PT < FDP
Mujer	1,05	1,11	1,06	PM < PT < FDP
Número de transbordos	1,00 *	1,36	1,36	PM = PT < FDP
Transbordo en subida	1,10	1,26	1,15	PM < PT < FDP
Sin escalera mecánica	1,31	1,43	1,09	PM < PT < FDP
Costo angular	0,57	0,40	0,70	PM > PT > FDP
Alejarse del destino	0,51	0,43	0,84	PM > PT > FDP
Acercarse al origen	1,24	1,33	1,07	PM < PT < FDP
Ruta con 10 o menos años	0,53	0,50	0,95	PM > PT > FDP
Conocimiento de la red	0,59	0,29	0,50	PM > PT > FDP
% medio de ocupación	1,20	1,60	1,34	PM < PT < FDP
Probabilidad de sentarse	1,00 *	1,10	1,10	PM = PT < FDP
Probabilidad de no subir	2,05	-	-	PM < PT

(* = estadísticamente iguales)

Se han considerado variables relacionadas con el costo angular de las distintas rutas (i.e. qué tan directas son) y su geometría (en particular, si los individuos se acercan al origen o se alejan del destino en alguna estación intermedia). Una de las principales ventajas de la inclusión de variables relacionadas con la topología de la red es el bajo costo de su recolección. Adicionalmente, incorporamos variables que se relacionan con el nivel de conocimiento que presentan los usuarios respecto a las distintas rutas alternativas, como la antigüedad y el volumen de uso. A partir de los resultados obtenidos, es posible afirmar que los parámetros estimados presentan sesgo cuando las nuevas variables propuestas son omitidas de la modelación. Esto ocasiona problemas al obtener tasas marginales de sustitución y en la capacidad explicativa y predictiva de los modelos. Así, es recomendable la realización de catastros físicos (e.g. características de las estaciones) y operacionales (e.g. información de viajes) para mejorar la especificación de los modelos de elección de ruta. De esta manera se obtienen estimadores más precisos y mejores predicciones.

Finalmente, se han demostrado y cuantificado las diferencias en las percepciones de las alternativas en la elección de ruta a lo largo del día. De esta manera, el comportamiento de los usuarios cambia entre los periodos punta mañana, punta tarde y fuera de punta. Es necesario considerar estas diferencias en la evaluación de proyectos, pues el uso inadecuado de las valoraciones del tiempo o los transbordos pueden resultar en sobreestimación o subestimación de los beneficios de una política de transporte. En este sentido, es necesaria la especificación adecuada de las funciones de utilidad de individuos, a fin de capturar de mejor manera sus preferencias (e.g. valoraciones de transbordos de la Tabla 5).

En el caso del Metro de Santiago la red puede considerarse pequeña y con pocas alternativas de rutas entre cada par origen destino si se compara con la red de otras ciudades (e.g. Nueva York, Londres, París, Madrid, Moscú). De la Tabla 3 observamos que, conforme aumenta la cantidad de rutas alternativas, los modelos propuestos mejoran significativamente respecto a los modelos base, por lo que en redes más densas la capacidad predictiva del nuevo modelo debiera ser aún mejor al compararlo con un modelo base estándar. Adicionalmente, en el caso de Santiago la distorsión entre el mapa geográfico y el mapa presentado a los usuarios es notable, pero no es tremendamente significativa. Sin embargo en otras ciudades con sistemas de Metro de alta complejidad en que los usuarios cuentan con muchas rutas alternativas, el mapa presenta distorsiones relevantes respecto del mapa geográfico.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con financiamiento del proyecto Fondecyt 1110720, el proyecto FONDEF D10I1049 y el Across Latitudes and Cultures-Bus Rapid Transit Centre of Excellence (www.brt.cl).

REFERENCIAS

- Bell, M. G. H. (1995). Alternatives to Dial's logit assignment algorithm. *Transportation Research Part B* 29, 287–295.
- Ben-Akiva, M. E., J. Walker, A. T. Bernardino, D. A. Gopinath, T. Morikawa y A. Polydoropoulou (2002). Integration of choice and latent variable models. En H. S. Mahmassani (Ed.), *In Perpetual Motion: Travel Behaviour Research Opportunities and Challenges*, 431-470. Pergamon, Amsterdam.
- Cascetta, E., A. Nuzzolo, F. Russo y A. Vitetta (1996). A modified logit route choice model overcoming path overlapping problems: specification and some calibration results for interurban networks. En J. B. Lesort (Ed.), *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, 697-711. Pergamon, Lyon.
- Cascetta, E. (2001). *Transportation Systems Engineering: Theory and Methods*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Conroy-Dalton, R. (2003). The secret is to follow your nose: route path selection and angularity. *Environment and Behavior* 35, 107–131.
- Daganzo, C. F. y Y. Sheffi (1977). On stochastic models of traffic assignment. *Transportation Science* 11, 253-274.
- Dial, R. B. (1971). A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration. *Transportation Research* 5, 83-113.
- Montello, D. R. (1991). Spatial orientation and the angularity of urban routes: a field study. *Environment and Behavior* 23, 47–69.
- Ortúzar, J. de D. y L. Willumsen. (2011). *Modelling Transport*. John Wiley and Sons, Chichester.
- Papinski, D., D. M. Scott y S. T. Goherty (2009). Exploring the route choice decision-making process: a comparison of planned and observed routes obtained using person-based GPS. *Transportation Research Part F* 12, 347-358.
- Prato, C. G. (2009). Route choice modeling: past, present and future research directions. *Journal of Choice Modelling* 2, 65-100.
- Prato, C. G., S. Bekhor y C. Pronello (2009). Latent variables and route choice behavior. *12th International Conference on Travel Behaviour Research*, Jaipur, India.
- Prashker J. N. y S. Bekhor (2004). Route choice models used in the stochastic user equilibrium problem: a review. *Transport Reviews* 24, 437-463.
- Ramming, M. S. (2001). *Network knowledge and route choice*. Tesis de Doctorado, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Raveau, S., R. Álvarez-Daziano, M. F. Yáñez, D. Bolduc y J. de D. Ortúzar (2010). Sequential and simultaneous estimation of hybrid discrete choice models: some new findings. *Transportation Research Record* 2156, 131–139.
- Raveau, S., J. C. Muñoz y L. de Grange (2011). A topological route choice model for metro. *Transportation Research Part A* 45, 138-147.
- Turner, A. (2001). Angular analysis. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Space Syntax*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 30.1–30.11.