

MODELANDO EL IMPACTO DE VARIABILIDAD SOBRE LA REALIZACIÓN DE ACTIVIDADES PARA DECIDIR HORA DE SALIDA

Nicolás Badiola, Pontificia Universidad Católica de Chile, nicolas.badiola@uc.cl
Sebastián Raveau, Pontificia Universidad Católica de Chile, sraveau@ing.puc.cl
Patricia Galilea, Pontificia Universidad Católica de Chile, pgalilea@ing.puc.cl

RESUMEN

Este trabajo explora cómo afecta la variabilidad del tiempo de viaje en la elección de hora de salida considerando las actividades realizadas en el origen y destino, mediante el uso de una encuesta de preferencias declaradas que recrea un día del individuo. Se encuentra que la variabilidad no afecta directamente la hora de viaje como proponen modelos basados en viajes, sino que lo hace según las actividades realizadas. Por tanto, la elaboración de modelos más realistas requiere considerar el patrón de actividades que realiza un individuo y debe incorporarse un horizonte de evaluación más amplio en la evaluación de proyectos.

Palabras claves: *Variabilidad de Tiempo de Viaje, Elección de Hora de Salida, Patrón Diario de Actividades*

ABSTRACT

The aim of this paper is to identify the impact of travel time variability on departure time choices within an activity-based context, through a stated preference survey that simulates a daily activity pattern. Main results show that travel time variability does not directly influence as trip based models propose, but by activity conduction. Therefore, more realistic models should consider individual's activity pattern and use broader horizons for proper cost-benefit analysis.

Keywords: *Travel Time Variability, Departure Time Choice, Daily Activity Pattern*

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los efectos no deseados del crecimiento urbano es la congestión, la cual provoca aumentos en los tiempos de viaje y que sean menos predecibles. Dos enfoques que se han utilizado para resolver estos problemas son la inversión en capacidad vial y la gestión de demanda de transporte. Debido a que el espacio urbano es limitado, cada vez ha tomado mayor atención el segundo, lo que requiere entender cómo (y cuándo) viajan las personas. Si bien se ha incorporado el impacto del tiempo de viaje promedio en la modelación de decisiones de viaje, no ha ocurrido así con su variabilidad.

Incluir la variabilidad posee consecuencias significativas en al menos dos aspectos. El primero se relaciona con el desarrollo de modelos más realistas, donde se incluya factores adicionales al tiempo promedio de viaje. Por ejemplo, ante presencia de variabilidad ciertos individuos prefieren salir antes de su hogar para llegar a tiempo a su trabajo, mientras que durante la tarde deciden cumplir su horario laboral a pesar de enfrentar mayor incertidumbre al viajar. El segundo aspecto se relaciona con la valoración de beneficios por reducir este efecto. Al tener mayor certeza sobre cuánto tomará un viaje, la persona no necesita salir con tanta anticipación para alcanzar a llegar a su destino y se puede reasignar tiempo en otras actividades (en el ejemplo anterior podría ser estar en el hogar). Estos beneficios no son evaluados actualmente en la evaluación de proyectos en Chile y, por lo tanto, el propósito de esta investigación es determinar cómo impacta la variabilidad de los tiempos de viaje sobre la decisión de hora de salida en un patrón diario de actividades dado.

Este artículo está organizando de la siguiente forma: La segunda sección muestra cómo se ha abordado el problema en los últimos años y la tercera presenta el marco de modelación que utiliza en esta investigación. Debido a la falta de estudios que posean un foco similar, se realizó una encuesta enfocada para este fin y que se presenta en la cuarta sección. Luego, se presenta la modelación de los datos obtenidos y se finaliza con una discusión de los resultados encontrados.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Durante las últimas décadas la modelación de demanda por transporte se ha basado en el Modelo Clásico de 4 Etapas, el cual se subdivide en las etapas de generación/atracción, distribución, partición modal y asignación. Con el fin de incorporar la elección horaria se ha añadido una quinta etapa para incluir la hora de salida, pero que suele considerar sólo el tiempo promedio de viaje. Existen principalmente dos enfoques que permiten incluir la variabilidad de tiempos de viaje en esta elección, que son los de Centralidad-Dispersión y Programación Horaria (Carrion y Levinson, 2012).

El Modelo de Centralidad-Dispersión fue propuesto por Jackson y Jucker (1981) para incorporar directamente la variabilidad en la elección horaria. Una formulación genérica se presenta en la Ecuación 1. La utilidad de un horario de salida es caracterizada por una medida de la centralidad de la distribución de tiempos de viajes (μ) y una medida de su dispersión (σ), las cuales serán ponderadas por los parámetros η y ρ . Por ejemplo, se podría utilizar la media y desviación estandar, respectivamente.

$$V = \eta\mu + \rho\sigma \quad (1)$$

El segundo modelo se conoce como Programación Horaria, el cual fue propuesto por Vickrey (1969) y formulado por Small (1982). Este modelo permite incluir, junto al tiempo de viaje, la posibilidad de llegar antes o después de una cierta hora preferida de cada individuo. Fosgerau y Karlström (2010) muestran que este se puede extender para incluir la variabilidad utilizando la utilidad esperada asociada. Esto se muestra en la Ecuación 2, donde μ representa el tiempo promedio de viaje, mientras que SDE corresponde al tiempo esperado con que se llega anticipadamente (*schedule delay early*) y SDL al tiempo que se llega atrasado (*schedule delay late*), según corresponda. Además, el modelo permite incorporar una penalización discreta por llegar tarde y que no depende de cuánto tiempo haya sido el atrasado, el cual está representado por la probabilidad de llegar tarde P_L .

$$V = \beta_{TT}\mu + \beta_{SDE}E(SDE) + \beta_{SDL}E(SDL) + \delta_L P_L \quad (2)$$

Es importante notar que bajo ciertas circunstancias ambos modelos son equivalentes para incorporar la variabilidad (Bates et al., 2001; Fosgerau y Karlström, 2010). No obstante, su impacto podría variar según las actividades de origen y destino involucradas, lo cual no está incorporado explícitamente en ninguno de los dos modelos. En el primer caso sólo se considera la distribución de los tiempos de viaje y, si bien el segundo incluye una penalización, esta se relaciona con la actividad de destino.

3. MODELOS BASADOS EN ACTIVIDADES

Como explican Ettema y Timmermans (2003) para estudiar correctamente la hora de salida es necesario considerar las actividades que realizan los individuos durante el día. Esto se debe a que el tiempo durante el día es finito, por lo que pasar más tiempo en una actividad disminuye el tiempo disponible para realizar aquellas que la suceden. Los dos modelos presentados en la sección anterior son basados en viajes y no se incluye el hecho de que el transporte es una demanda derivada.

A partir de estas limitaciones es que Yamamoto et al. (2000) proponen extender el horizonte de estimación a uno diario, lo cual da lugar a una utilidad compuesta según la Ecuación 3. Por un lado, se tiene la utilidad U^A que representa la realización de n actividades dentro del día y, por el otro, una (des)utilidad provocada por los $n - 1$ viajes respectivos. En este contexto se entiende un viaje como el medio que permite vincular dos actividades sucesivas que se encuentran separadas espacio-temporalmente y no como un fin en sí mismo.

$$\max U = \max(U^A + U^T) = \max\left(\sum_{i=1}^n U_i^A + \sum_{i=1}^{n-1} U_i^T\right) \quad (3)$$

De la formulación anterior se desprenden algunas conclusiones intermedias. En primer lugar, se tiene que los modelos basados en viajes son una versión restringida de los modelos basados en actividades. Relacionado con lo anterior, se tiene que el tiempo de viaje se compone tanto por una

des-utilidad propia, como del tiempo que dejó de estar disponible para realizar otras actividades durante el día (Ettema y Timmermans, 2003; Fosgerau y Karlström, 2010; Horni et al., 2015).

En caso de existir viajes instantáneos, la hora óptima de salida corresponde a la intersección entre ambas curvas. Por lo tanto, cuando los tiempos de viaje no son nulos, la hora de salida óptima se encuentra antes de este punto y se genera una pérdida de utilidad. Tseng y Verhoef (2008) demuestran que las penalizaciones del Modelo de Programación Horaria de Small (*SDE* y *SDL*) corresponden a utilizar utilidades marginales constantes en las actividades de origen y destino.

En la Figura 1 se presenta un ejemplo en que se debe decidir en la mañana a qué hora salir desde el Hogar (Actividad 1) para dirigirse al Trabajo (Actividad 2). Para esto se supone que la utilidad marginal es continua y decreciente en el origen, mientras que en el destino es creciente. En caso de que el tiempo de viaje sea 0 la hora de salida sería cerca de las 9AM, mientras que si el viaje toma una hora sería cerca de las 8:15. En ambos casos un desvío sobre la hora de término o inicio óptima de las actividades de origen y destino genera una pérdida de utilidad, ya que se reduce el área determinada por ambas curvas.

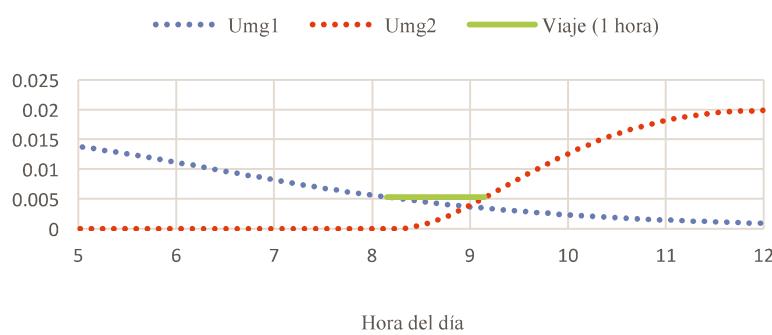


Figura 1: Ejemplo de utilidad marginal de dos actividades cualquiera y elección de hora de viaje

Al igual que para modelos basados en viajes, la expresión anterior puede generalizarse para incluir la variabilidad de los tiempos de viaje y encontrar las horas de salida de cada actividad (Jenelius, 2012; Jenelius et al., 2011). La diferencia radica en que el horario de término de una actividad corresponde a aquel que maximiza la utilidad esperada de las actividades que siguen durante el día. Este proceso comienza analizando la penúltima actividad (último viaje) y se repite recursivamente hasta encontrar la hora óptima de término de la primera actividad del día.

Para emplear correctamente un modelo basado en actividades, es necesario estudiar las preferencias de las actividades que se realizan durante el día y la utilidad del viaje por sí mismo (ver modelo completo en la Ecuación 3). Existen diversas formas funcionales que se han utilizado para esto: utilidad marginal constante o *step models* (Fosgerau y Karlström, 2010; Small, 1982), utilidad marginal (de)creciente o *slope models* (Fosgerau y Engelson, 2011) y con utilidad marginal asintóticamente (de)creciente o *logarithm models* (Charypar y Nagel, 2005).

En su forma más simple, los modelos anteriores solo permiten estimar preferencias con respecto a la duración de las actividades. Como una alternativa para permitir variaciones en la utilidad marginal según la hora del día, Joh et al. (2003) propusieron el uso de una función logística. Una cualidad atractiva de esta forma es que permite diferenciar un intervalo donde la utilidad marginal

es creciente hasta un punto de saturación (conocido como *warm-up period*) y un intervalo en que la utilidad marginal comienza a decaer hasta ser nula (conocido como *cool-down period*).

Esta función se determina a partir de la Ecuación 4 y cuenta con seis parámetros que permiten obtener preferencias sobre el comportamiento: U_{max} , U_{min} , α , β , γ y ξ . Como se puede apreciar en la Figura 2, la utilidad queda determinada por una asíntota superior y una inferior, que corresponden a los parámetros U_{max} y U_{min} , respectivamente. El punto de saturación mencionado en el párrafo anterior queda representado por α y corresponde al momento con mayor utilidad marginal absoluta. Esta formulación permite que la utilidad marginal de la actividad no sea simétrica en torno al punto de saturación, lo que se determina a partir de γ . Existe simetría cuando toma valor y en caso de que sea menor a este umbral, la utilidad estará cargada hacia la derecha del punto de saturación (si es mayor, cargada hacia la izquierda).

$$U^A(t_{s_i}, t_{d_i}) = U_{min} + \frac{U_{max} - U_{min}}{(1 + \gamma \cdot \exp(\beta(\alpha - (t_{d_i} - \xi t_{s_i}))))^{1/\gamma}} \quad (4)$$

Luego, el parámetro β permite medir tanto la sensibilidad sobre la duración, como si al individuo le gusta o no realizar la actividad. Por un lado, a mayor módulo de β la utilidad marginal tendrá un *peak* breve en duración y de gran magnitud. En segundo lugar, cuando β posee signo positivo, se está en presencia de actividades que tienen utilidad marginal positiva, es decir, que las personas disfrutan haciendo; en cambio, cuando es negativo la utilidad marginal es negativa, por lo que usualmente corresponde a actividades que los individuos prefieren no realizar.

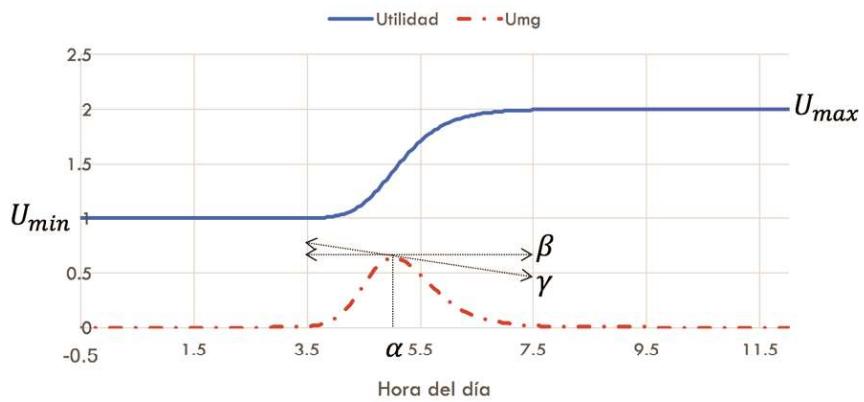


Figura 2: Utilidad correspondiente a una función logística y representación de sus parámetros

La última variable utilizada en esta formulación corresponde a ξ , que es una medida de la flexibilidad sobre la hora del día para realizar la actividad. Si bien originalmente se deseaba representar preferencias que dependen de la hora del día, Ettema y Timmermans (2003) extienden el modelo para incluir actividades que dependen de la duración. Para esto utilizan una combinación lineal entre la hora de inicio y la hora de término, determinada por el parámetro ξ que toma valores entre 0 y 1. Cuando es 1 significa que la utilidad depende de la duración (al igual que los modelos de la sección anterior), mientras que si es 0 sólo varía según la hora del día. En caso de tener un valor intermedio ambas variables afectan la utilidad y se debe evaluar cuál predomina

comparándose a 0.5. Un resultado importante al que llegan Jenelius et al. (2011) es que la flexibilidad de las actividades determina cómo se distribuirá el tiempo ahorrado en caso mejorar el nivel de servicio. Cuando las actividades no son flexibles, este se distribuye entre la actividad predecesora y sucesora del mismo, mientras que si existen flexibilidad a lo largo del día se podría reasignar a cualquier actividad dentro del día.

4. ENCUESTA

En Chile, la modelación de demanda de transporte se ha realizado principalmente con modelos basados en viajes, por lo que no es habitual encontrar estudios que incorporen la modelación de actividades. En el año 2015 se desarrolló una encuesta a nivel nacional, cuyo propósito era conocer las preferencias reveladas acerca de cómo los chilenos utilizan el tiempo (Instituto Nacional de Estadísticas, 2016). No obstante, este estudio no recopiló los horarios en los cuales se efectúan estas actividades y, por tanto, tampoco cuándo hubieran preferido realizarlas.

La inclusión de la variabilidad de los tiempos de viajes sobre la elección de hora de salida tampoco ha recibido mayor atención, siendo trabajos más recientes Arellana (2012) y Lizana (2013). Estos se realizaron a partir de una encuesta de preferencias declaradas, cuyo propósito era evaluar una sucesión de viajes dentro del día. Sin embargo, tampoco incluyeron la modelación de actividades por sí misma, sino que lo consideraron como un factor exógeno.

Como no existen estudios que aborden la variabilidad de tiempo de viaje y la realización de actividades simultáneamente, se elaboró una encuesta específica para este fin. Se decidió emplear una encuesta de preferencias declaradas, ya que recolectar la distribución de los tiempos de viaje que enfrenta un individuo es un proceso largo y costoso, tanto para los encuestados como para los encuestadores. Con el fin de que represente mejor el comportamiento actual, las alternativas son personalizadas a cada encuestado según sus condiciones de viaje y las actividades que realizaron durante la semana anterior.

Debido a que se desea modelar un día completo del encuestado y existen variadas combinaciones de actividades, se tuvo que limitar cuáles incluir y en qué patrón de actividades. Las actividades que se decidió fueron: Trabajo, Estudio, Compras, Recreación y Hogar. Estas se escogieron según la frecuencia de realización de actividades dentro de la EOD 2012 (SECTRA, 2014). Por un lado, se escogieron Trabajo y Estudio por ser la ocupación principal del 60% de los encuestados. Por otro, se incluyó Compras y Recreación, que son actividades optionales y que cuentan con percepciones opuestas. Finalmente, Recreación corresponde a una actividad que genera satisfacción por parte de las personas mientras más se realiza, Compras se espera que sea percibido como negativo. Adicionalmente debe incluirse Hogar, ya que corresponde a la actividad basal con que se inicia y termina el día en el 98.1% de la muestra.

El propósito de la primera sección es recopilar información revelada acerca del comportamiento actual de los individuos, que se utiliza para construir las alternativas de las siguientes secciones. En relación a la realización de actividades, se destaca los horarios de inicio y de término de la actividad principal, junto a la elección del patrón de actividades que más se asemeja a lo que realizaron la semana anterior. Con respecto a los viajes, la información más relevante corresponde al tiempo de viaje y modo de transporte que utilizan para llegar a su ocupación principal.

Considerando que el transporte es una demanda derivada, la segunda etapa se diseñó para obtener preferencias declaradas de la realización de actividades de manera independiente. El formato de las preguntas se muestra en la Figura 3, donde se presentan dos alternativas que se diferencian por las horas de inicio y término de la actividad, junto con la duración determinada por ambas. Estas preguntas se repiten tres veces para cada una de las actividades realizadas por el encuestado, con el fin de explorar las preferencias individuales y no sólo obtener los horarios actuales de los encuestados.

 Trabajo

¿Entre qué horarios prefiere trabajar?

| | Alternativa A | Alternativa B |
|---------------------|----------------------|----------------------|
| Hora de inicio | 8:30 | 9:30 |
| Hora de término | 18:15 | 18:45 |
| Tiempo transcurrido | 9 horas y 45 minutos | 9 horas y 15 minutos |

Alternativa A Alternativa B

Figura 3: Ejemplo de pregunta de la encuesta acerca de preferencias en la realización de actividades (sección 2)

La tercera sección busca recrear un día del encuestado a partir del patrón diario escogido en la primera sección, que aborda sucesivamente cada viaje de ese día y donde la construcción de las alternativas depende de sus elecciones previas. Cada pregunta cuenta con tres alternativas, que se diferencian en el promedio y variabilidad de los tiempos de viaje, costo monetario y modo de transporte. Para representar la variabilidad se presentan tres tiempos de viaje equiprobables y que se presentan en un formato de barras propuesto por Hollander (2006) (Figura 4). Al igual que en la segunda sección, este experimento se realiza recreando 3 días independientes entre sí del individuo.

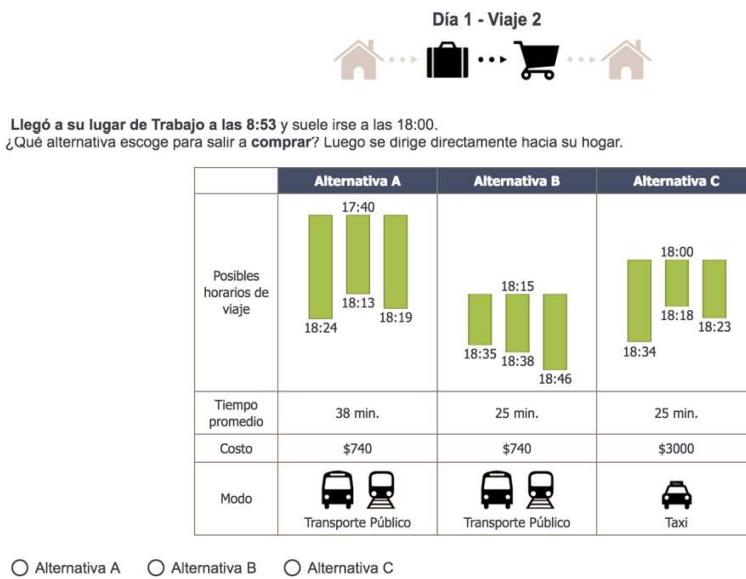


Figura 4: Ejemplo de pregunta de la encuesta acerca de preferencias en sobre la hora de viaje (sección 3)

5. CASO PRÁCTICO

Los modelos presentados en esta sección corresponden a la estimación de formas funcionales de las actividades y del impacto de la variabilidad en la elección horaria, a partir de la encuesta presentada en la sección anterior. El estudio se enfoca en adultos jóvenes entre 18 y 35 años, con el fin de obtener un grupo que presenten diversas ocupaciones y posean un comportamiento similar con respecto a otras actividades. Aprovechando la penetración de redes sociales en este segmento se empleó difusión mediante redes sociales y muestro por bola de nieve entre los encuestados.

La encuesta se llevó a cabo entre el 23 de marzo y 12 de abril de 2017. Se alcanzó un total de 560 respuestas y con un 94.3% de individuos que tienen entre 18 y 35 años. Sobre las actividades realizadas por los individuos, la ocupación principal de la muestra corresponde a Trabajo y Estudio (32% y 66% respectivamente). Por lo tanto, el mecanismo de difusión fue exitoso y se alcanzó una alta presencia de *millenials*. Sobre las dos actividades complementarias, se encontró que un 44% declara realizar actividades de Recreación luego de su ocupación principal y sólo un 9% realizar Compras. El 47% restante declaró dirigirse directamente a su hogar luego de la jornada laboral.

5.1 Modelación de actividades

Como se explicó en la descripción de la encuesta, antes de modelar la variabilidad de los tiempos de viaje se deseaba estudiar las preferencias sobre la realización de actividades. Debido a que Hogar constituye una actividad base para los individuos, esta se considerará más adelante como nivel de referencia (Jenelius, 2012). A continuación, se presenta la modelación de la utilidad marginal de las actividades restantes: Trabajo, Estudio, Compras y Recreación.

Si bien es posible utilizar cualquier forma funcional en la modelación, resulta de interés poder modelar múltiples *peaks* de utilidad marginal. Para esto se utilizó sumas de funciones logísticas, debido a que entregan mayor información sobre los gustos. Debido a que el experimento no considera preguntas con alternativas con diferentes actividades, no es posible evaluar las constantes U_{min} y sólo se puede estimar la utilidad marginal de cada alternativa.

$$U^A(t_s, t_d) = \sum_j U_{min,j} + \frac{U_{max,j} - U_{min,j}}{(1 + \gamma_j \cdot \exp(\beta_j(\alpha_j - (t_d - \xi_j t_s))))^{1/\gamma}} \quad (5)$$

La estimación fue realizada en el *software R*, empleando un Modelo Logit Multinomial. En este caso la utilidad de cada alternativa corresponde a la Ecuación 5 y que tiene una forma no lineal, a diferencia de modelos tradicionales que usan utilidades lineales sobre las variables. Debido a esto, cuando un parámetro resultaba ser no significativo se fija su valor con respecto al punto de comparación presentado en la sección anterior. En el caso de ξ al no resultar significativamente distinto de cero y/o de uno, las estimaciones se desarrollaron probando ambos límites y sólo se presenta los mejores resultados.

Tabla 1: Parámetros estimados de utilidades de forma logística para actividades

| PARÁMETRO | TRABAJO | ESTUDIO | | COMPRAS | | RECREACIÓN |
|-----------|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | Mujer | Hombre | Mujer | Hombre | |
| U_{max} | 41.72 *** -3.51 *** | 5.61 *** | 5.61 *** | -4.92 *** | -5.611 *** - | 16.89 ** |
| U_{min} | 0 ⁺ 0 ⁺ | 0 ⁺ |
| α | 14.37 *** 20.01 *** | 14.45 *** | 17.81 *** | 0 ⁺ | 0 ⁺ | 0 ⁺ |
| β | 2.88 * 25.128 *** | 1 ⁺ | 1 ⁺ | 1 ⁺ | 2.23 * | 1 ⁺ |
| γ | 1 ⁺ 30.99 *** | 1 ⁺ | 1 ⁺ | -0.99 | -0.99 | 1 ⁺ |
| ξ | 0 ⁺ 0 ⁺ | 0 ⁺ | 0 ⁺ | 1 ⁺ | 1 ⁺ | 1 ⁺ |
| N | 471 | 1104 | | 174 | | 774 |
| ll_0 | -326 | -765 | | -120 | | -536 |
| ll | -299 | -720 | | -112 | | -476 |

*Significativo al 90%, **Significativo al 95%, ***Significativo al 99%, +Parámetro fijo

Los resultados de la estimación se encuentran en la Tabla 1. Adicionalmente, la Figura 5 muestra cómo varía la utilidad marginal según la hora del día o duración según los resultados encontrados. La estimación de la utilidad de Trabajo fue realizada con 471 respuestas provenientes de trabajadores. La mejor estimación fue obtenida utilizando dos funciones logísticas y que dependen sólo de la hora del día. Se puede ver que la utilidad marginal es positiva hasta cerca de las 5PM, que coincide con el fin de la jornada laboral y se vuelve cero. En caso de que la jornada se extienda luego de esta hora, existe un rápido decaimiento negativo y alcanza un mínimo cerca de las 8.30PM. Estos resultados se condicen con el comportamiento esperado de los individuos, quienes castigan tener que trabajar más allá del horario laboral regular.

En el caso de Estudio, la muestra cuenta con 1104 respuestas y que sólo provienen de quienes Estudio es su ocupación principal. Si bien esta es una actividad obligatoria, al igual que Trabajo, los resultados muestran que la satisfacción crece monótonamente a lo largo del día. Estas preferencias podrían adjudicarse a la disponibilidad de horas de estudio luego de clases. Este es un resultado que no se esperaba, pero muestra la importancia que tiene la posibilidad de gestionar el horario fuera de clases por parte los jóvenes.

Dentro de la encuesta hubo pocas respuestas de Compras, por lo que la muestra es menor y consta de 177 respuestas. Se encontró que la utilidad depende completamente de la duración, pues el parámetro de flexibilidad ξ es 1. Como se muestra en la Figura 5, la utilidad marginal es negativa y decreciente con el paso del tiempo. No obstante, existen diferencias en la tolerancia entre hombres y mujeres, donde estas poseen una menor desutilidad por minuto de realización de Compras. Hay que considerar que, si bien los resultados muestran que en general a los encuestados no les gusta pasar más tiempo en esta actividad, podrían existir individuos que disfruten de ella. Adicionalmente, esta percepción negativa solo considera utilidad marginal y no la experiencia completa de compras, para lo cual habría que estimar la constante $U_{min}^{compras}$.

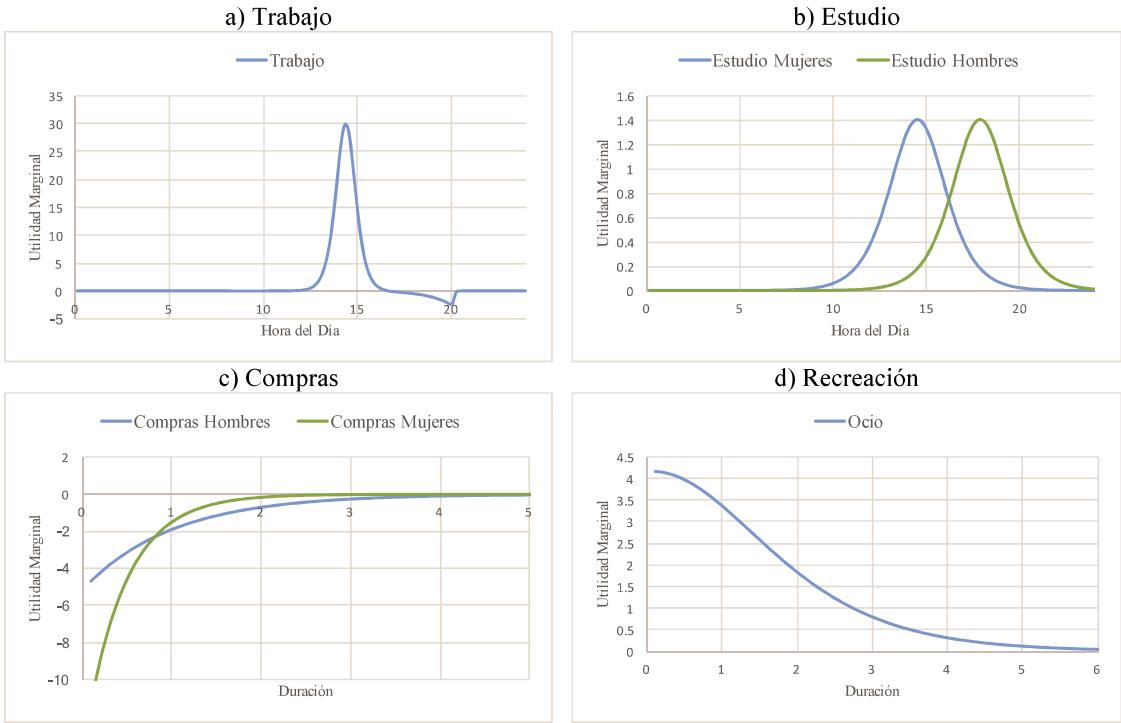


Figura 5: Representación gráfica de la estimación de utilidades y utilidades marginales de actividades, según hora del día o duración

La estimación de Recreación fue elaborada con 471 respuestas, cuyos resultados muestran que la utilidad marginal es positiva y decreciente con el transcurso del tiempo. Al igual que compras, se encuentra que es una actividad flexible con un ξ igual a 1. Debido a que el punto de máxima utilidad marginal (α) coincide con el comienzo de su realización, existe una clara asimetría cargada hacia la izquierda. Esto provoca que existan grandes variaciones en la región de indiferencia cuando hay una gran duración, ya que pasar media hora adicional impacta más cuando se lleva una hora que cuando se lleva tres horas realizándola, por ejemplo.

5.2 Modelación de la variabilidad de tiempos de viaje

Una vez que se ha estimado la utilidad marginal de las actividades analizadas, se puede evaluar cómo impacta la variabilidad de los tiempos de viaje en la hora de salida. Para esto se utiliza la tercera sección de la encuesta, la cual recrea los viajes que se deben realizar para el patrón de viajes revelado. Se considera cada elección de viaje junto a las actividades de origen y destino, sin incluir aquellas que se realizarán posteriormente en el día.

$$\begin{aligned} U &= \delta_{Ori} \cdot U_{Ori}^A + U^T + \delta_{Des} \cdot U_{Des}^A \\ U^T &= \eta\mu + \rho\sigma + \theta \cdot Costo + ASC_{modo} \end{aligned} \quad (6)$$

En esta expresión la utilidad del viaje se basa en Modelos de Centralidad-Dispersión, pero se agrega el costo monetario del viaje y una constante modal según la alternativa. Esta formulación permite ver el impacto directo de la variabilidad y un componente sobre la realización de actividades. Se

utilizan ponderadores asociados a las actividades de origen y destino, ya que en la etapa anterior se emplearon diferentes parámetros de escala del modelo Logit y hay que estandarizarlos.

A partir de la función de utilidad de la Ecuación 6, se estimaron diversos modelos Logit Multinomiales (MNL) y Jerárquicos (NL). El proceso se llevó a cabo mediante el *software* Biogeme, tomando como *input* los resultados de la etapa anterior. Los resultados del escalamiento y de los componentes del viaje se presentan en la

Tabla 2, para lo cual se considera la utilidad de marginal de Hogar como referencia y se fija en cero. De este modo, las utilidades marginales se entiende como las preferencias por sobre estar en el Hogar (Tseng y Verhoef, 2008).

Tabla 2: Parámetros estimados de utilidad con forma logística y Hogar a partir de elecciones de viaje

| | TRABAJADORES | | ESTUDIANTES | |
|-----------------------|--------------|----------------|-------------|----------------|
| | MNL | HL | MNL | HL |
| $\delta_{Trabajo}$ | 0.19** | 0.17* | - | - |
| $\delta_{Estudio}$ | - | - | 0.90*** | 1.12*** |
| $\delta_{Compras}$ | -1.87*** | 1.95** | 2.27*** | 2.44*** |
| $\delta_{Recreación}$ | 0.25* | 0.75** | 0.019 | - |
| η | -3.85*** | -6.60*** | -2.76*** | -2.62*** |
| θ | -0.000626*** | -0.00117*** | -0.000348** | -0.000670** |
| ASC_{Auto} | 0.21 | - | - | - |
| ASC_{Taxi} | -1.01*** | - | - | - |
| $ASC_{Motorized}$ | - | 2.25578*** | -1.3*** | -1.24*** |
| μ_{TPubl} | - | 0.220803*** | - | 1 ⁺ |
| μ_{TPriv} | - | 1 ⁺ | - | 0.21*** |
| N | 1343 | 1343 | 2696 | 2696 |
| ll_0 | -1475 | -1475 | -2961 | -2961 |
| ll | -1228 | -1190 | -2332 | -2266 |

*Significativo al 90%, **Significativo al 95%, ***Significativo al 99%, +Parámetro fijo

A partir de las diferencias en la bondad de ajuste y significancia de los parámetros utilizados, se determinó que el modelo NL permite representar mejor el comportamiento tanto de trabajadores como de estudiantes. En el caso de trabajadores se utilizaron las agrupaciones transporte privado (Auto y Taxi) y transporte público, que poseen un valor de μ de 0.22 y 1, respectivamente. Esto significa que consideran las alternativas con modos privados como independientes, pero que no distinguen entre aquellas que poseen transporte público. Ocurre lo contrario en el caso de estudiantes, donde su nido de transporte público colapsa y se perciben como alternativas independientes, mientras que transporte privado es considerado como un gran modo.

Con respecto a la realización de actividades, en el caso de trabajadores se encuentra que todas las actividades mantienen su signo y son significativas. Las actividades para el caso de Estudiantes se comportan de manera similar, a excepción de Recreación que resulta ser no significativo. Tomando

en consideración el punto de referencia, significa que estudiantes perciben como equivalente la utilidad marginal de Recreación y Hogar. Esto significa que trabajadores lo perciben como una actividad distinta, que se podría explicar por su patrón más rígido y que disfrutan más cuando salen por ser más limitado. Cabe notar que para poder estimar una constante que diferencie entre estas actividades, habría que hacer comparaciones entre distintos patrones de actividades y que no fue considerado en esta versión de la encuesta.

Al analizar los componentes del viaje se aprecia que los signos son consistentes con los valores esperados. Dentro de las modelaciones se intentó incluir diferentes medidas de la variabilidad de manera explícita, pero ninguna resultó significativa y se dejó fuera del modelo. Esto implica que la variabilidad provoca un efecto indirecto asociado a la realización de las actividades, por lo que debiese preferirse una formulación de Small extendida en lugar de un modelo Centralidad Dispersión.

Para evaluar el valor del tiempo de viaje (VTW) correctamente hay que considerar tanto la desutilidad directa asociada al viaje y una desutilidad asociada a la realización de actividades mediante la Ecuación 7 (Ettema y Timmermans, 2003). Empleando los datos de esta encuesta para estimar un modelo basado en viajes, se encuentra que sólo utilizar la razón η/θ genera una subestimación del 3% del VTV para el caso de trabajadores y una sobreestimación del 24% para el caso de estudiantes. Por lo tanto, la estimación de beneficios de proyectos de transporte podría presentar errores y se debe corregir para obtener una evaluación real que considere el tiempo como recurso.

$$\frac{\partial c}{\partial \mu} = \frac{\partial U / \partial \mu}{\partial U / \partial c} = \frac{-U'^{Dest} + \eta}{\theta} \quad (7)$$

Tabla 3: Comparación del Valor del Tiempo de Viaje entre modelos basados en viajes y basados en actividades

| | TRABAJADORES | | ESTUDIANTES | |
|-----------------|-----------------------|------------------|-----------------------|------------------|
| | Basado en Actividades | Basado en Viajes | Basado en Actividades | Basado en Viajes |
| η | -6.6 | -6.57 | -2.62 | -4.09 |
| θ | -0.00117 | -0.00121 | -0.00067 | -0.000841 |
| VTW | \$5,641 | \$5,475 | \$3,910 | \$4,863 |
| % de diferencia | -3.0% | | +24.3% | |

6. CONCLUSIONES

Estudiar el efecto de la variabilidad de los tiempos de viaje requiere el uso de modelos basados en actividades. Debido a que en Chile la modelación de demanda de transporte todavía se basa en viajes, existen pocos estudios relacionados y ninguno incorpora simultáneamente la variabilidad. Por lo tanto, se diseñó una encuesta específica para este fin, la cual fue aplicada a 560 individuos. La muestra cuenta con una alta composición de adultos entre 18 y 35 años, por lo que los resultados presentados a continuación se limitan a esta población.

Como primer paso fue necesario modelar la utilidad producida por la realización de actividades. Mediante el uso de funciones logísticas fue posible estudiar las preferencias incluyendo la hora del día y duración, lo cual no es posible con otras funciones utilizadas tradicionalmente. Se encontró que actividades obligatorias, como Trabajo y Estudio, aumentan su utilidad con el paso del día, pero que la primera posee un castigo en caso de realizarla más allá del horario laboral. Para el caso de recreación y compras se encuentra que su utilidad solo depende de la duración, pero que existen variaciones cómo se tolera comprar según su género. Otras interacciones fueron probadas, pero los parámetros no variaban sustancialmente y se prefirió utilizar los modelos más simples.

Al estudiar la elección de hora de salida, se ve que la variabilidad no posee un impacto directo a la hora de escoger la hora de viaje. Por lo tanto, su impacto depende indirectamente a través de las actividades que vincule un viaje en particular. Adicionalmente, se muestra que para evaluar correctamente proyectos de transporte se requiere introducir estos efectos, tanto por su impacto en la predicción como en la valoración de beneficios. Se muestra que la evaluación actual presenta errores asociados a la estimación del Valor del Tiempo de Viaje por emplear modelos basados en viajes.

Dentro de las limitaciones de este trabajo es que se enfoca en comprender las preferencias de los individuos, pero no trata directamente la aplicación predictiva de los resultados encontrados. En futuros estudios se debe estimar la reasignación del tiempo liberado por cambios en el nivel de servicio entre otras actividades y su valoración, lo cual es fundamental para incorporar los beneficios de proyectos que vayan en esta línea. Adicionalmente, es necesario un desarrollo computacional que permita realizar la estimación de modelos no lineales. Algunos *softwares* tradicionales, como Biogeme o Alogit, no logran maximizar correctamente la verosimilitud, por lo se emplearon métodos de maximización alternativos disponibles en el *software R*.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación fue financiada por CONICYT mediante su programa de Magíster Nacional año 2016.

REFERENCIAS

- Arellana, J. (2012). *Modelos de elección de la hora de inicio de viaje*. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Bates, J., Polak, J., Jones, P., & Cook, A. (2001). The valuation of reliability for personal travel. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 37(2–3), 191–229.
- Carrion, C., & Levinson, D. (2012). Value of travel time reliability: A review of current evidence. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(4), 720–741.
- Charypar, D., & Nagel, K. (2005). Generating complete all-day activity plans with genetic algorithms. *Transportation*, 32(4), 369–397.
- Ettema, D., & Timmermans, H. (2003). Modeling Departure Time Choice in the Context of Activity Scheduling Behavior. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1831(1), 39–46.
- Fosgerau, M., & Engelson, L. (2011). The value of travel time variance. *Transportation Research*

Part B: Methodological, 45(1), 1–8.

- Fosgerau, M., & Karlström, A. (2010). The value of reliability. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(1), 38–49.
- Hollander, Y. (2006). Direct versus indirect models for the effects of unreliability. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40(9), 699–711.
- Horni, A., Nagel, K., & Axhausen, K. W. (2015). *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. Instituto Nacional de Estadísticas. (2016). *Encuesta Nacional sobre Uso del Tiempo 2015*. Santiago, Chile.
- Jackson, B. W., & Jucker, J. V. (1981). An Empirical Study of Travel Time Variability and Travel Choice Behavior. *Transportation Science*, 16(4), 460–475.
- Jenelius, E. (2012). The value of travel time variability with trip chains, flexible scheduling and correlated travel times. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(6), 762–780.
- Jenelius, E., Mattsson, L.-G., & Levinson, D. (2011). Traveler delay costs and value of time with trip chains, flexible activity scheduling and information. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(5), 789–807.
- Joh, C., Arentze, T., & Timmermans, H. (2003). Estimating non-linear utility functions of time use in the context of an activity schedule adaptation model. In *10th International Conference on Travel Behaviour Research* (pp. 10–15). Lucerne.
- Lizana, P. (2013). *Modelos conjuntos de elección de modo y hora de inicio del viaje con datos combinados de preferencias reveladas y declaradas*. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- SECTRA. (2014). *Encuesta origen y destino de viajes 2012*.
- Small, K. A. (1982). The Scheduling of Consumer Activities: Work Trips. *The American Economic Review*, 72(3), 467–479.
- Tseng, Y.-Y., & Verhoef, E. T. (2008). Value of time by time of day: A stated-preference study. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(7–8), 607–618.
- Vickrey, W. S. (1969). Congestion Theory and Transport Investment. *The American Economic Review*, 59(2), 251–260.
- Yamamoto, T., Fujii, S., Kitamura, R., & Yoshida, H. (2000). Analysis of Time Allocation, Departure Time, and Route Choice Behavior Under Congestion Pricing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1725(0), 95–101.