UN ENFOQUE MICROECONOMICO PARA LA GENERACION DE VIAJES URBANOS

Francisco Martínez C, Mauro Huenupi A.
Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile,
Blanco Encalada 2120, Casilla 228-3, Santiago, Chile
e-mail: fmartine@cec.uchile.cl

RESUMEN

El hecho que la generación de viajes es un fenómeno que se deriva de la necesidad de participar en actividades fuera del hogar, es una hipótesis conocida y aceptada desde hace tiempo, sin embargo, hasta el momento no ha sido incorporada explícitamente en la modelación tradicional de la demanda de viajes.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un enfoque o marco teórico para estudiar la generación de viajes que se fundamente en esta hipótesis básica y que permita alcanzar una mayor comprensión de la movilidad de las personas. Naturalmente, esto requiere como primera tarea estudiar el fenómeno de participación en actividades, el que denominamos demanda de actividades. Para hacerlo se utiliza un modelo microeconómico de comportamiento del usuario que está basado en la hipótesis de maximización de la utilidad con restricciones, el que permite calcular la demanda óptima de actividades. Conocida esta demanda, y al utilizar el concepto de encadenamiento, es posible determinar el número de viajes que se requieren para llevar a cabo las actividades.

El resultado principal del trabajo es un enfoque teórico para estudiar la demanda de viajes a nivel individual en un contexto urbano. Este enfoque justifica la incorporación de una serie de variables en la modelación de la generación de viajes y muestra como éstas influyen sobre la movilidad. Dichas variables están relacionadas con características socioeconómicas del individuo y con atributos del sistema de transporte y uso de suelo, luego permite vincular la generación de viajes con el resto de las etapas de un modelo integrado transporte-uso de suelo.

1. MOTIVACION Y OBJETIVOS

Las características básicas del fenómeno de la generación de viajes en un contexto urbano son bien conocidas (Domencich y McFadden ,1975), sin embargo, algunas de ellas no han sido incorporadas adecuadamente en la modelación. Quizás el ejemplo más claro de esta situación es el hecho que la hipótesis básica: la generación de viajes es el resultado de la necesidad que tienen los individuos de participar en actividades; no ha sido incorporada explícitamente en los modelos tradicionales de demanda de viajes. Éstos tratan de explicar la generación de viajes sin tener en cuenta que cada desplazamiento es sólo un medio para que el individuo pueda realizar una actividad. El viaje en sí mismo no tiene explicación, se justifica por el deseo o necesidad de realizar compras o visitas sociales, de trabajar, estudiar o divertirse. Esta característica de la movilidad de las personas es uno de los principales temas de investigación del enfoque basado en actividades (ver Kitamura, 1988).

Las observaciones anteriores dejan a la vista un camino alternativo para estudiar la generación de viajes; similar al utilizado en el enfoque basado en actividades, pero con elementos de la modelación tradicional: en vez de preocuparnos por reproducir directamente la generación de viajes podemos estudiar primero el fenómeno de participación en actividades y, a partir de él, derivar la generación de viajes. Si bien el estudio de la demanda de actividades es una tarea compleja, afortunadamente se han desarrollado modelos microeconómicos que permiten hacerlo. Una vez conocida la demanda de actividades es posible calcular, de manera más o menos sencilla, la correspondiente demanda de viajes. En este proceso es clave el concepto de encadenamiento de actividades, el que sólo tiene sentido si se analiza a nivel individual, por lo que todos los desarrollos deben mantener ese nivel de desagregación. En otras palabras, se abandona el hogar como unidad básica de análisis de la generación de viajes.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un enfoque o marco de trabajo para estudiar la generación de viajes que permita alcanzar una mayor comprensión de la movilidad de las personas. La mayor compresión se refiere a conocer las variables que tienen influencia en el fenómeno y como lo afectan; en particular, interesa saber cuál es el papel del sistema de transporte-uso de suelo y de las características socioeconómicas del individuo en la demanda de viajes. En este trabajo no se pretende desarrollar un modelo operativo de generación de viajes.

El resto del artículo está organizado de manera que el próximo capítulo se desarrolla el enfoque teórico, como veremos una pieza fundamental del enfoque es la función de utilidad empleada para representar las preferencias del individuo, al considerar una función de utilidad específica es posible obtener un modelo teórico de generación de viajes. Este modelo es analizado en el capítulo 3 dando énfasis a los aportes metodológicos que de él se derivan. Mayores detalles sobre el contenido de este artículo se pueden encontrar en Huenupi (1997).

2. DESARROLLO DEL ENFOQUE

El enfoque teórico consta de dos elementos principales: un modelo de demanda de actividades y un modelo condicional de demanda de viajes. Al final, estos dos elementos se unen para producir un nuevo modelo de generación de viajes.

2.1. Demanda de actividades

Para estudiar la participación del individuo en actividades se utiliza el modelo microeconómico de comportamiento desarrollado por Jara-Díaz *et al.* (1994). En él se plantea que el bienestar del individuo proviene de la valoración de tres atributos asociados a las actividades en que participa: tiempo dedicado, calidad y tiempo de viaje. Bajo los supuestos de la teoría de consumidor, el individuo intenta maximizar este bienestar teniendo en consideración que dispone de una cantidad limitada de tiempo y dinero, además del hecho que la localización de actividades (uso de suelo) limita la calidad con que puede realizar actividades en cada lugar.

A partir del planteamiento original de Jara-Díaz *et al.* es posible deducir que el comportamiento del individuo queda representado por el siguiente problema de optimización:

$$
\begin{aligned}
&\underset{q,t,x}{Max}\; U(q,\tau,tv) \\
&sa \\
&\sum_k \tau_k + \sum_k tv_k \le TT \\
&p\cdot x + \sum_k c_k \le I + \sum_k \omega_k \tau_k \\
&R(x,q,\tau,z) = 0 \\
&f_k \ge f_k^{min} \quad \forall\, k = 1,\ldots,K
\end{aligned}
\tag{1}
$$

donde q,τ y tv corresponden a los vectores de calidad, tiempo dedicado y tiempo de viaje asociado a cada tipo de actividad (k), x el vector de bienes consumidos por el individuo y p el vector de precios de estos bienes, TT el tiempo total disponible en el período de modelación, c_k el costo de transporte asociado a la actividad k, I el ingreso del individuo en el período TT, ω_k la tasa salarial de la actividad k (para la mayoría de los casos esta variable vale cero), R representa una relación tecnológica entre bienes, calidad, tiempo y características de las zonas donde se realizan las actividades. Esta relación tiene por objetivo establecer que para realizar actividades con un cierto nivel de calidad y duración (q,τ) se necesita consumir una cierta cantidad de bienes (x) en una zona con características (z) que aseguren la factibilidad de realizar las actividades con calidad q. Por ejemplo, para disfrutar un concierto se requiere un buen teatro, que sólo estará disponible en ciertos lugares, y comprar una entrada. Finalmente, se incluye una restricción para establecer la condición de que ciertas actividades deben realizarse con una frecuencia mínima durante el período de modelación, por ejemplo se debe dormir al menos una vez durante el día.

La primera expresa el tiempo total dedicado a una actividad k (τ_k) en términos de visitas, como el producto de su frecuencia de realización (f_k) y su duración promedio ($\overline{T}_k$). La segunda relación establece en forma explícita el carácter derivado de la demanda de transporte, al definir el número de viajes asociados a la actividad o propósito k (B_k) como una función de la frecuencia de realización de actividades, incluyendo la posibilidad de efectuar cadenas de actividades. Finalmente, se relaciona el tiempo y costo total de viaje con el tiempo ($\bar{t}_k$) y costo unitario ($\bar{c}_k$) promedio de viaje para cada actividad k.

Además, se definen las siguientes relaciones:

$$\left.\begin{aligned} \tau_k &= f_k \overline{T}_k \\ B_k &= B_k(f) \\ tv_k &= B_k \bar{t}_k \\ c_k &= B_k \bar{c}_k \end{aligned}\right\} \quad \forall k = 1,\ldots,K \tag{2}$$

Es importante mencionar que en el trabajo de Jara-Díaz *et al.* se supone conocido el destino y modo de transporte utilizado en cada viaje, por lo tanto, $\bar{t}_k$ y $\bar{c}_k$ corresponden al promedio ponderado (por el número de viajes) del tiempo y costo de viaje de cada desplazamiento asociado a la actividad k, sin distinguir el destino ni el modo de transporte utilizado. Lo mismo ocurre con la frecuencia y el número de viajes, ya que estas variables corresponden al total de veces que se realiza la actividad y al total de viajes asociados a ella. En consecuencia, en este trabajo se analiza la generación de viajes conocida la decisión de destino y modo de transporte o, en otras palabras, conocida la distribución de viajes y la partición modal.

De acuerdo al problema de optimización recién planteado, cada individuo elige el conjunto de actividades (dedicación y calidad) y bienes que maximizan su utilidad y satisfacen las restricciones de disponibilidad de tiempo e ingreso, de relación tecnológica y frecuencia mínima. Para resolver este problema se puede utilizar el método de Lagrange, el cual permite encontrar las condiciones necesarias para la solución del problema. En este caso, la función lagrangeana (L) corresponde a:

$$\begin{aligned} L = U(q,\tau,tv) + \mu\Big(TT - \sum_k \tau_k - \sum_k tv_k\Big) + \lambda\Big(I + \sum_k \omega_k \tau_k - p\cdot x - \sum_k c_k\Big) \\ + \sum_i \alpha_i R_i(x,q,\tau,z) + \sum_k \eta_{f_k}(f_k - f_k^{min}) \end{aligned} \tag{3}$$

Las variables μ, λ y η_f son los multiplicadores de Lagrange y representan la ganancia en utilidad que se produce al relajar en una unidad la restricción de tiempo, ingreso y frecuencia mínima, respectivamente. La variable α_i es el multiplicador asociado a la *i*-ésima relación de transformación y su valor es siempre distinto de cero; este valor puede ser interpretado conceptualmente como el beneficio potencial de cambios marginales en el uso del suelo, en el sentido que tales cambios modifican la restricción R generando beneficios o perdidas cuyo valor está dado por α_i.

Dado que las variables de optimización son (q,τ,x), las condiciones de optimalidad de primer orden quedan representadas por el siguiente sistema de $(3K+2J+2)$ ecuaciones:

$$q_k \frac{\partial L}{\partial q_k} = 0 \,, \quad \tau_k \frac{\partial L}{\partial \tau_k} = 0 \,, \quad \eta_{f_k} \frac{\partial L}{\partial \eta_{f_k}} = 0 \qquad \forall\, k = 1,\ldots,K$$
$$x_i \frac{\partial L}{\partial x_i} = 0 \,, \quad \alpha_i \frac{\partial L}{\partial \alpha_i} = 0 \qquad \forall i = 1,\ldots,J \tag{4}$$
$$\mu \frac{\partial L}{\partial \mu} = 0 \,, \quad \lambda \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0$$

donde $\{1,\ldots,K\}$ es el conjunto de actividades disponibles y $\{1,\ldots,J\}$ es el conjunto de bienes consumidos.

Las ecuaciones (3) y (4) definen el sistema de ecuaciones que se muestra a continuación:

$$q_k \frac{\partial L}{\partial q_k} = q_k \Big[\frac{\partial U}{\partial q_k} + \sum_i \alpha_i \frac{\partial R_i}{\partial q_k}\Big] = 0 \qquad \forall\, k = 1,\ldots,K \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \tau_k \frac{\partial L}{\partial \tau_k} &= f_k \frac{\partial L}{\partial f_k} \\ &= f_k \Big[\frac{\partial U}{\partial f_k} - \mu \overline{T}_k - \mu \sum_j \frac{\partial B_j}{\partial f_k} \bar{t}_j + \lambda \omega_k \overline{T}_k + \\ &\quad - \lambda \sum_j \frac{\partial B_j}{\partial f_k} \bar{c}_j + \sum_i \alpha_i \frac{\partial R_i}{\partial \tau_k} \frac{\partial \tau_k}{\partial f_k} + \eta_{f_k} \Big] = 0 \qquad \forall\, k = 1,\ldots,K \end{aligned} \tag{6}$$

$$x_i \frac{\partial L}{\partial x_i} = x_i \Big[\sum_j \alpha_j \frac{\partial R_j}{\partial x_i} - \lambda\, p_i\Big] = 0 \qquad \forall\, i = 1,\ldots,J \tag{7}$$

Para simplificar la resolución de este problema suponemos que las restricciones de frecuencia mínima no son activas ($\eta_{f_k} = 0, f_k > f_k^{min}$) y que las restricciones de tiempo e ingreso se cumplen por igualdad; esto último de acuerdo a la condición de no saturación local (ver Varian, 1992, Capítulo 7).

En consecuencia, tenemos un sistema de $(2K + J + 2)$ ecuaciones y el mismo número de incógnitas (q, f, x, μ, λ). Luego de una serie de desarrollos algebraicos, las ecuaciones (5) a (7) permiten obtener la calidad y frecuencia óptima de las actividades, sus expresiones son las siguientes:

$$q_k^* = q_k^o \, exp\Big[\frac{\lambda}{V \varepsilon_{q_k}^U} \Delta(p \cdot x)\Big] \tag{8}$$

$$f_k^* = \frac{V\varepsilon_{f_k}^U}{CG_k} \quad (9)$$

donde q^o es el nivel de calidad observado, $\Delta(p \cdot x)$ representa la variación del gasto en bienes entre la situación óptima y la observada, $\varepsilon_{q_k}^U$ y $\varepsilon_{f_k}^U$ son la elasticidad de la utilidad respecto a la calidad y a la frecuencia de la actividad k; $V \equiv U(q^*, \tau^*, tv^*)$ corresponde a la función de utilidad indirecta, es decir, la máxima utilidad que se puede alcanzar dadas las restricciones; $CG_k = \lambda[\overline{T}_k(M_k - \omega_k) + \sum_j \frac{\partial B_j}{\partial f_k}\overline{c}_j] + \mu[\overline{T}_k + \sum_j \frac{\partial B_j}{\partial f_k}\overline{t}_j]$ es el costo marginal generalizado neto de realizar la actividad k; y $M_k = \frac{\partial(p \cdot x)}{\partial \tau_k}$ es el aumento en el gasto debido a un aumento en la dedicación.

Es importante mencionar que en las ecuaciones (8) y (9) todas las funciones están implícitamente evaluadas en el óptimo. Para obtener expresiones más explícitas de la calidad y frecuencia óptima que permitan derivar un modelo de generación de viajes, es necesario tener una función de utilidad particular y una relación entre viajes y frecuencia de las actividades. Estos problemas son abordados en las siguientes secciones.

2.2. Demanda de viajes

En esta sección se analiza la relación entre viajes y actividades. Para esto se utiliza el trabajo de Hautzinger (1981), que plantea un modelo estadístico que suponiendo conocida la demanda de actividades no residenciales permite calcular el número esperado de viajes necesarios para llevarlas a cabo. Una de las variables fundamentales del modelo es el número de cadenas o ciclos que realiza el individuo para cumplir su patrón de actividades, el estudio del encadenamiento es el objetivo principal del trabajo de Hautzinger.

Un ciclo es una secuencia temporal y espacial de actividades, donde la primera y la última actividad se realizan en el hogar. Si llamamos C al número de ciclos, f a la frecuencia total de actividades no residenciales y B al número de viajes, entonces se cumple:

$$B = f + C; \quad 1 \le C \le f \qquad \forall f \ge 1 \quad (10)$$

Por lo tanto, $f + 1 \le B \le 2f$. La cota inferior del número de viajes se alcanza cuando el individuo realiza todas las actividades dentro de un único ciclo y la cota superior cuando el individuo regresa al hogar luego de cada actividad. Este razonamiento también justifica las cotas del número de ciclos.

Nótese que el número de ciclos es equivalente al número de viajes de salida o retorno al hogar, luego la relación entre B, f y C es compatible con la modelación de la generación de viajes que distingue viajes basados (BH) y no basados en el hogar (NBH). Los viajes basados en el hogar son aquellos donde el origen o el destino del viaje es el hogar, los no basados en el hogar son todos los demás. Entonces, es fácil deducir que (ver Goulias *et al.*, 1990):

$$\begin{aligned} BH &= 2C \\ NHB &= B - BH = f - C \end{aligned} \tag{11}$$

Por otro lado, el número de ciclos está relacionado con la frecuencia. Por ejemplo: si $f = 1$ entonces $C = 1$, si f es grande entonces C debe tender a ser pequeño en proporción a la frecuencia porque de otra forma el número de viajes, el tiempo y costo total asociado a ellos tiende a ser demasiado alto; obligando al individuo a realizar actividades de corta duración y a pasar viajando una parte importante del tiempo disponible.

Siguiendo el trabajo de Hautzinger, la incertidumbre en el comportamiento del individuo conduce a suponer que la frecuencia y el número total de ciclos son variables aleatorias discretas no negativas, por lo tanto, el número de viajes es también una variable aleatoria. En particular, su esperanza condicional en la frecuencia total es:

$$\begin{aligned} E(B|f) &= f + E(C|f) \\ &= f + f\,\overline{p}_f \end{aligned} \tag{12}$$

donde $\overline{p}_f$ es el promedio de la probabilidad condicional de retorno, es decir, una medida agregada de la posibilidad de regresar al hogar después de realizar una actividad cualquiera, si se realizan f actividades.

Empíricamente, Hautzinger muestra que una expresión adecuada para $\overline{p}_f$ es:

$$\overline{p}_f = e^{-\alpha(f-1)} \tag{13}$$

donde α es la propensión del individuo a encadenar actividades. Entonces, dado un valor de α, el individuo volverá al hogar más a menudo si la frecuencia es baja y volverá menos a menudo si es la frecuencia es alta. Por otro lado, dado un valor de la frecuencia, el individuo regresará más al hogar si la propensión es baja y volverá menos si es alta.

Finalmente, la esperanza condicional del número de ciclos se transforma en $E(C|f) = f\,e^{-\alpha(f-1)}$, que al ser reemplazada en la ecuación (12) permite obtener la esperanza condicional del número de viajes:

$$\overline{B}(f) = E(B|f) = f(1 + e^{-\alpha(f-1)}) \tag{14}$$

Es claro que el número de viajes resulta acotado por $f \leq \overline{B}(f) \leq 2f \quad \forall f \geq 0$, tal como se aprecia en la siguiente figura:

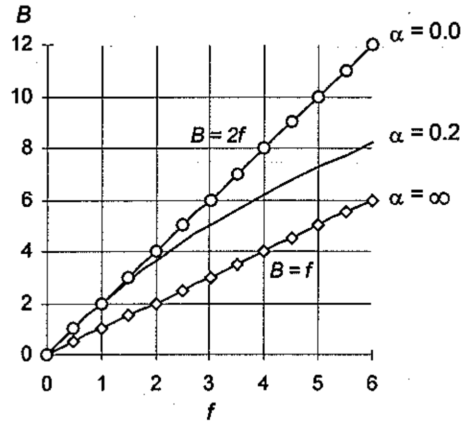

Figura 1 : Número de viajes en función de la frecuencia y sus cotas

Además, la figura permite apreciar que la función $\overline{B}$ reproduce con exactitud el número de viajes para dos valores particulares, pero muy importantes, de la frecuencia total: 0 y 1, cuyos valores del número de viajes deben ser 0 y 2 respectivamente. Esto porque si no se realizan actividades fuera del hogar entonces no es necesario viajar y si se realiza sólo una entonces se requieren dos viajes porque se supone que el individuo regresa al hogar al menos una vez durante el período de modelación. La importancia de calcular correctamente el número de viajes en estos casos radica en que los valores más comunes de la frecuencia son cero y uno. Por lo tanto, si se logra una buena estimación de la frecuencia se obtiene una buena estimación del número de viajes para muchas de las observaciones.

Como la variable de decisión del modelo de comportamiento es la frecuencia de cada tipo de actividad, es necesario extender el trabajo de Hautzinger para poder calcular el número de viajes asociado a cada propósito. Una alternativa sencilla es considerar que:

$$\begin{aligned}\overline{B}_k(f) &= E(B_k \mid f) = f_k + \delta_k E(C \mid f) \\ &= f_k + \delta_k f\, e^{-\alpha(f-1)}\end{aligned} \tag{15}$$

donde $\sum_k f_k = f$ y $\sum_k \delta_k = 1$. La variable $0 \le \delta_k \le 1$ permite asociar a la actividad k una parte de los ciclos o viajes de retorno al hogar ya que estos viajes inducen costos atribuibles, de alguna forma, a las actividades del ciclo. Además, por construcción se cumple $\overline{B}(f) = \sum_k \overline{B}_k(f)$.

Es muy importante destacar que, debido a la presencia de la frecuencia total en la ecuación (15), la demanda de viajes con cierto propósito resulta dependiente de la frecuencia del resto de las actividades, lo cual es razonable dado que las actividades comparten un tiempo y un ingreso total finito.

2.3. Modelo de generación de viajes

En esta sección se unen los modelos de demanda de actividades y demanda de viajes, desarrollados en las secciones 2.1 y 2.2, para producir un modelo de generación de viajes.

Para que la unión de ambos modelos sea posible, sólo se deben considerar las actividades que el individuo realiza fuera del hogar ya que las actividades residenciales no intervienen en el modelo de demanda de viajes. Una forma sencilla de hacer lo anterior es mediante una modificación del modelo de comportamiento de modo que en él sólo se consideren las actividades no residenciales, lo cual se traduce en un cambio en la interpretación de las restricciones : las variables I y TT corresponden de ahora en adelante al ingreso y tiempo disponibles para realizar actividades fuera del hogar, el resto de las variables mantienen su definición original. Hecha esta salvedad, se debe considerar que la expresión de la frecuencia óptima (ecuación 9) presenta términos genéricos que dificultan su análisis, este problema se estudia a continuación.

Como primer paso se debe calcular la variación del número de viajes ante un cambio en la frecuencia. Si suponemos que el número de viajes puede ser modelado mediante su esperanza condicional, $B_j(f) = \overline{B}_j(f)$, podemos obtener a partir de la ecuación (15) la siguiente relación:

$$\frac{\partial B_j}{\partial f_k} = 1_{k=j} + \delta_k \psi \tag{16}$$

donde $1_{k=j}$ vale 1 si $k = j$ y 0 en otro caso, y $\psi = f\, e^{-\alpha(f-1)}[\frac{1}{f} - \alpha]$ es la derivada de la esperanza condicional del número de ciclos respecto a la frecuencia total.

Como segundo paso es necesario conocer la función de utilidad directa. Por ejemplo, podemos suponer que las preferencias del individuo quedan bien representadas por una utilidad de tipo *Cobb-Douglas*, es decir:

$$U(q,\tau,tv) = \rho \prod_k q_k^{\upsilon_k} \tau_k^{\beta_k} tv_k^{\gamma_k} \tag{17}$$

donde la elección de esta función no tiene más fundamento que su popularidad a nivel académico y el hecho que posee las propiedades fundamentales de una función de utilidad. Si se utiliza otro tipo de función se obtendrán resultados distintos en forma a los mostrados en este trabajo, pero similares en contenido.

Como $tv_k = B_k(f)\bar{t}_k$, las elasticidades de la utilidad respecto a la calidad y a la frecuencia son las siguientes:

$$\varepsilon^U_{q_k} = \upsilon_k$$
$$\varepsilon^U_{f_k} = \beta_k + f_k(\frac{\gamma_k}{B_k} + \psi\eta) \tag{18}$$

Reemplazando las ecuaciones (16) y (18) en las ecuaciones (8) y (9), y luego de una serie de desarrollos algebraicos, se obtiene:

$$q^*_k = q^o_k \, exp[\frac{\lambda}{V\upsilon_k}\Delta(p \cdot x)] \tag{19}$$

$$f^*_k = \frac{V\,[\beta_k + f_k(\frac{\gamma_k}{B_k} + \psi\eta)]}{\lambda[\bar{c}_k + \bar{c}\psi + \overline{\overline{T}}_k(M_k - \omega_k)] + \mu[\bar{t}_k + \bar{t}\psi + \overline{\overline{T}}_k]} \tag{20}$$

donde $\eta = \sum_j \frac{\gamma_j \delta_j}{B_j}$, $\bar{c} = \sum_j \bar{c}_j \delta_j$ es un promedio ponderado del costo de viaje asociado a todas las actividades y $\bar{t} = \sum_j \bar{t}_j \delta_j$ es análogo al anterior, pero para el tiempo de viaje. Aquí se hace más evidente la influencia de los costos de transporte sobre la frecuencia de la actividad, tanto los asociados a ella misma como los del resto de la actividades. El efecto de las otras actividades se produce por la modelación del encadenamiento ya que ésta define una relación explícita entre todos los viajes.

Las condiciones de primer orden del problema de optimización que representa el comportamiento del individuo (ecuación 3) también permiten obtener el valor de λ y μ, variables que corresponde a la utilidad marginal del ingreso y del tiempo, respectivamente. Es posible demostrar que sus expresiones aproximadas son las siguientes:

$$\lambda = V[\frac{\rho_{\lambda 1}}{I} + \frac{\rho_{\lambda 2}}{TT}]\sum_j \varepsilon^U_{f_j}$$
$$\mu = V[\frac{\rho_{\mu 1}}{I} + \frac{\rho_{\mu 2}}{TT}]\sum_j \varepsilon^U_{f_j} \tag{21}$$

donde ρ es un conjunto de parámetros desconocidos. Dos de ellos asociados a λ y otros dos asociados a μ.

Al reemplazar la ecuación (21) en la ecuación (20), se obtiene:

$$f^*_k = \left\{(\frac{\rho_{\lambda 1}}{I} + \frac{\rho_{\lambda 2}}{TT})[\bar{c}_k + \bar{c}\psi + \overline{\overline{T}}_k(M_k - \omega_k)] + (\frac{\rho_{\mu 1}}{I} + \frac{\rho_{\mu 2}}{TT})[\bar{t}_k + \bar{t}\psi + \overline{\overline{T}}_k]\right\}^{-1} \frac{\varepsilon^U_{f_k}}{\sum_j \varepsilon^U_{f_j}} \tag{22}$$

que es la expresión final de la frecuencia óptima de participación en actividades no residenciales. A partir de la ecuación (22) podemos estudiar el efecto sobre la demanda de actividades de pequeños cambios en las variables que intervienen en el modelo. Primero, es importante notar que las utilidades marginales son, por definición, positivas (λ, $\mu > 0$). Luego, si el costo y/o el tiempo de viaje aumentan entonces la frecuencia disminuye, lo mismo sucede con la dedicación promedio aunque su impacto es menos negativo si la actividad es remunerada ($\omega_k > 0$). Por el contrario, la frecuencia aumenta: si aumenta la elasticidad del tiempo dedicado (β_k), si disminuye la del tiempo de viaje (γ_k), y si aumenta la tasa salarial (ω_k).

Siguiendo los desarrollos de la sección anterior, la demanda óptima de viajes queda representada por la esperanza condicional del número de viajes evaluada en la frecuencia óptima:

$$B_k(f^*) = E(B_k \big| f^*) = f_k^* + \delta_k f^* e^{-\alpha(f^*-1)} \tag{23}$$

Esta ecuación corresponde al modelo de generación de viajes desarrollado en este trabajo, obtenido de la unión del modelo de demanda de actividades y el modelo de encadenamiento. De esta manera se recoge la característica fundamental de la demanda de transporte: es una función de la demanda de actividades.

La ecuación (23) establece que el número de viajes asociados a la actividad k es igual al número de veces que se realiza la actividad, ya que cada realización requiere un desplazamiento espacial o viaje de ida, más una proporción del número de ciclos. El número de ciclos equivale al número de viajes de retorno al hogar. Estos viajes no pueden asociarse a una actividad no residencial específica ya que no tienen relación particular con alguna de ellas. El objetivo de un viaje de retorno al hogar es permitir al individuo el desarrollo de actividades residenciales, tales como: descanso, cuidado del jardín, interacción con los otros integrantes de la familia, etc. En este trabajo el viaje de retorno se asocia a las actividades no residenciales en una proporción δ_k. Esta proporción puede ser definida con algún criterio, por ejemplo en proporción al tiempo dedicado a la actividad.

Si reemplazamos la ecuación (22) en la ecuación (23) se obtiene la función que define de manera más completa el modelo de generación de viajes. En términos genéricos esta función es:

$$B = h(\bar{c}, \bar{t}, \bar{T}, I, TT, \upsilon, \beta, \gamma, f, \alpha, \delta) \tag{24}$$

Es decir, el número de viajes es una función de las mismas variables que la frecuencia de realización de actividades, pero también de las variables que definen el modelo de encadenamiento (α, δ). La ecuación (24) define un nuevo enfoque, con un sólido fundamento microeconómico y estadístico, para analizar el fenómeno de la generación de viajes.

2.4 Relación entre generación de viajes y uso de suelo

La frecuencia óptima de cada actividad (ecuación 22) puede ser interpretada como el resultado de la maximización de su accesibilidad integral (acc_k), definida como el beneficio neto de obtenido de realizar la actividad (Martínez, 1995). El beneficio neto total puede ser calculado como la diferencia entre la utilidad de realizar un conjunto de actividades no residenciales menos el costo de llevarlas a cabo. Luego $acc = U - CGT$, donde U es la función de utilidad y $CGT = \lambda(p \cdot x - \sum_k \omega_k \tau_k + \sum_k c_k) + \mu(\sum_k \tau_k + \sum_k tv_k)$ es el costo generalizado total asociado a la realización de las actividades y que está relacionado con el costo generalizado marginal definido anteriormente a través de $CG_k = \frac{\partial CGT}{\partial f_k}$. La ecuación (22) está definida para el conjunto óptimo de frecuencias de modo que $U = V$ y corresponde a: $V \cdot \varepsilon^U_{f_k} - f_k CG_k = 0$, con $\varepsilon^U_{f_k} = \frac{\partial V}{\partial f_k}\frac{f_k}{V}$, luego puede ser escrita como:

$$f_k \frac{\partial acc}{\partial f_k} = 0 \qquad \forall k = 1,\ldots,K \tag{25}$$

donde $\frac{\partial acc}{\partial f_k} = \frac{\partial (V - CGT)}{\partial f_k}$ es la variación del beneficio neto producto de un cambio en la frecuencia de la actividad k. Las condiciones de optimización de segundo orden del modelo de comportamiento aseguran que la solución de la ecuación (25) es un máximo, en consecuencia, la demanda óptima de la actividad se produce en el momento en que se maximiza el beneficio neto asociado a ella. El interés por mostrar esta relación se debe a que la accesibilidad es el nexo microeconómico entre el sistema de transporte y el sistema de uso de suelo. Por lo tanto, como la frecuencia determina el número de viajes, la ecuación (25) permite que la decisión de movilidad de los individuos pase a ser un elemento endógeno en la modelación conjunta del sistema de transporte-uso de suelo. En efecto, la agregación del beneficio neto individual (acc_n) para generar la medida de beneficio (acc_h) que determina la localización residencial del hogar (Martínez, 1995), es:

$$\underbrace{acc_h}_{\uparrow\ \text{Localización residencial}} = \sum_n acc_n = \sum_n \sum_k \underbrace{\int \frac{\partial acc_n}{\partial f_k^n} df_k^n}_{\uparrow\ \text{Generación de viajes}} \tag{26}$$

donde las sumatorias recorren todas las actividades realizadas y todos los individuos (n) que pertenece al hogar.

3. DISCUSION Y COMENTARIOS

En este trabajo se ha desarrollado un marco teórico para estudiar la generación de viajes a nivel individual en un contexto urbano. A nivel teórico el enfoque establece que la generación de viajes tiene las siguientes características:

- depende de la decisión de asignación de tiempo a todas las actividades ;
- es función de los costos de transporte;
- está determinada por características socioeconómicas del individuo y por su valoración de la calidad, del tiempo dedicado a las actividades y del tiempo de viaje; y
- varía según la disposición o posibilidad de encadenar actividades.

Estas observaciones invalidan algunos de los supuestos utilizados en los modelos tradicionales de generación de viajes. Por ejemplo: la independencia de la generación para distintos propósitos de viaje no es compatible con la modelación del encadenamiento; y la independencia respecto a los costos de transporte es contraria a la definición de restricciones al comportamiento de carácter temporal y monetario, ya que si las aceptamos como válidas entonces los costos de transporte aparecerán como determinantes de la generación de viajes. Por otro lado, se hace evidente que el enfoque descrito en este trabajo sólo puede ser aplicado a individuos debido a la necesidad de contar con variables socioeconómicas y de comportamiento de viaje propias de cada persona: tiempo e ingreso disponible, tiempo dedicado y de viaje para cada actividad, valoración de atributos, y propensión a encadenar actividades.

Los desarrollos de la sección 2.4 muestran que existe un vínculo microeconómico entre la generación de viajes y el sistema de transporte-uso de suelo que puede ser útil para avanzar en el desarrollo de mejores modelos de análisis del desarrollo urbano.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por FONDECYT, proyecto1950280.

REFERENCIAS

Domencich, T. y D. McFadden (1975) **Urban Travel Demand: A Behavioral Analysis.** North Holland, Amsterdam.

Goulias, K., R. Pendyala y R. Kitamura (1990) Practical method for the estimation of trip generation and trip chaining. **Transportation Research Record 1285**, 47-56.

Hautzinger, H. (1981) Combined modelling of activity and trips patterns: a new approach to the trip generation problem. **Proceedings 9th PTRC Summer Annual Meeting, Seminar N,** 271-283.