

## **FINANCIAMIENTO Y PROVISIÓN ÓPTIMA DE INFRAESTRUCTURA Y SERVICIOS DE TRANSPORTE**

Nicolás Pavón  
njpavon@uc.cl

Luis Ignacio Rizzi  
Departamento de Ingeniería de Transporte  
Pontificia Universidad Católica de Chile  
Casilla 306, Código 105, Santiago 22, Chile  
Fax: 2 2553 0281; E-mail: [lir@ing.puc.cl](mailto:lir@ing.puc.cl)

### **RESUMEN**

En este artículo estudiamos cómo distintos mecanismos de financiamiento afectan la provisión óptima de infraestructura vial y servicios de transporte público y los niveles de servicio. Los mecanismos de financiamiento considerado son (i) la tarifa vial por kilómetro circulado, (ii) el impuesto a los combustibles y (iii) el impuesto al consumo generalizado, permitiéndose el uso de más de uno de estos instrumentos de manera conjunta. Se plantea un modelo simple de equilibrio general en el que el costo marginal de los fondos públicos es endógeno. El modelo hace consideraciones explícitas en materia de equidad y considera las externalidades por demoras y contaminación atmosférica. Se analizan distintos escenarios mediante simulación.

El resultado más destacado es que al considerar razones de equidad y presencia de externalidades, la tarificación primero mejor deja de ser la mejor solución y el uso de subsidios cruzados entre usuarios de transporte y /o el uso de impuestos distorsivos se vuelven deseables. Otro resultados relevante es que la provisión de infraestructura vial varía de manera considerable en función de los mecanismos de financiamiento adoptados; sin embargo, las velocidades de circulación (tanto de autos como de buses) tienden a ser similares entre distintos escenarios.

## INTRODUCCIÓN

¿Cómo debe financiarse la infraestructura vial? ¿Cuál es el nivel óptimo a proveer? ¿Diferirá este nivel según el mecanismo que se utilice para financiarla? ¿Qué efectos e implicancias tendrá el mecanismo elegido en el uso de la infraestructura vial y en las particiones modales? ¿Cómo debe financiarse el transporte público? ¿Qué efectos e implicancias tendrá el mecanismo en el diseño y nivel de servicio del transporte público? ¿Cómo se verá afectado el bienestar tanto social como individual?

En la literatura de economía de transporte, existe un vacío de estudios que aborden de manera conjunta la provisión de infraestructura vial, la provisión de servicios de transporte público y su financiamiento, considerando aspectos de equidad. En esta investigación, se busca abordar este tema y responder, en una primera instancia, las preguntas planteadas en el párrafo anterior.

Un estudio seminal que trata el tema del financiamiento de la infraestructura vial es Mohring y Harwitz (1962). Bajo ciertas condiciones, (i) retornos constantes de escala en la construcción de capacidad vial, (ii) homogeneidad de grado cero en los tiempos de viaje como función de las variables flujo y capacidad y (iii) divisibilidad en la provisión de infraestructura vial, los ingresos por tarificación vial serán tales que cubrirán exactamente el costo de la infraestructura vial. Para ello, la decisión de provisión de infraestructura y tarificación han de realizarse de manera simultánea. En este caso, la tarifa vial es igual a los costos marginales externos de utilizar la infraestructura vial. El resultado obtenido es una tarificación primero mejor.

Otros estudios intentaron demostrar qué ocurría con el nivel de infraestructura vial a proveer cuando no se podía hacer uso de un instrumento primero mejor. Entre ellos se encuentran los trabajos de Mohring (1974), Wheaton (1978) y Pines y Sadka (1981), quienes demostraron numéricamente que una reducción en la tarifa vial en relación a su valor óptimo entregaría un nivel de capacidad vial mayor al óptimo, es decir, al del caso de primero mejor. Considerando una tarifa vial inferior a la óptima, Wilson (1983) concluye que el nivel de la capacidad vial de una política de segundo mejor diferirá de la óptima según el valor de la elasticidad precio de los viajes. En particular, sería menor si la elasticidad precio es lo suficientemente pequeña. D’Ouville y McDonald (1990) determinan que bajo una política de segundo mejor, la capacidad vial óptima será mayor o menor a la de una política de primero mejor, dependiendo fundamentalmente de los valores de dos parámetros: la elasticidad precio de la demanda por viajar y la elasticidad de sustitución de la función de producción. Utilizando aproximaciones de primer orden, concluyen que la capacidad en el caso de la política de segundo mejor es mayor, lo que valida los resultados de Mohring (1974), Pines y Sadka (1981) y Wheaton (1978).

Otras investigaciones intentaron determinar el impuesto óptimo a los combustibles como sustituto de una tarifa vial. Tal es el caso de los trabajos de Parry y Small (2005) y Newbery (2005). Sin embargo, en sus análisis el nivel de infraestructura vial estaba fijo, por lo que no se determinó su nivel óptimo. Lo que sí tomó en cuenta Newbery (2005) al momento de

calcular el impuesto óptimo a los combustibles, fueron los costos asociados a la infraestructura vial existente, aunque no considerando si el nivel actual era o no el óptimo.

Ninguno de los estudios mencionados considera heterogeneidad de los usuarios, sino un solo tipo de usuario, por lo que los problemas distribucionales son ignorados. Según Verhoef y Small (2004), no considerar la heterogeneidad de los usuarios (en cuanto a valores subjetivos de los tiempos de viaje, por ejemplo) en escenarios donde se aplica una tarificación vial, puede llevar a una subestimación de los beneficios que entrega la misma tarificación vial. Mayeres y Proost (2001) sostienen que los aspectos de equidad llevan al diseño de impuestos distorsivos, por lo que no deben ser ignorados.

De Palma y Lindsey (2004) también tomaron en cuenta la heterogeneidad de los individuos al evaluar los efectos de la tarificación vial. Consideraron diferentes tipos de usuarios, con distintos niveles de ingreso, valores subjetivos del tiempo y tamaños de los vehículos. Todo esto en un escenario de equilibrio general. No obstante, al igual que los demás estudios, se consideró la capacidad vial como dada y no se trataron otras externalidades distintas a la congestión vial.

Parry y Timilsina (2010) calcularon la tarificación vial y el impuesto a los combustibles óptimos para Ciudad de México, tomando en cuenta usuarios heterogéneos, externalidades asociadas a la contaminación atmosférica y a la accidentabilidad, como también distintos medios de transporte, como el automóvil, buses privados, buses provistos por el gobierno y un tren provisto también por el gobierno. Además, su estudio se enmarcó en un modelo de equilibrio general. Sin embargo, una vez más, el nivel de infraestructura vial no formó parte de las variables de decisión del problema y no se consideraron otros impuestos diferentes a los dos ya mencionados. Por otro lado, Parry y Small (200X) analizan el subsidio óptimo para sistemas de transporte público urbano, ignorando los aspectos de provisión de infraestructura vial y su tarificación.

Tratando de responder algunas de las preguntas planteadas en el primer párrafo, Basso y Silva (2014) desarrollaron un modelo de equilibrio parcial para evaluar los beneficios asociados a distintas políticas de transporte, para dos ciudades distintas: Santiago y Londres. Las políticas evaluadas fueron la tarificación vial, el uso de pistas exclusivas para el transporte público y el subsidio al transporte público. Plantearon un modelo de elección modal discreta, con la posibilidad de elegir entre distintos períodos (punta y fuera de punta) y entre dos modos de transporte (bus y automóvil), además de la opción de no viajar en absoluto. Para el caso de la ciudad de Santiago tomaron en cuenta también la heterogeneidad de los usuarios, no así para el caso londinense. Su modelo de tráfico considera la congestión cruzada entre transporte público y privado, como también la congestión existente en los paraderos de buses. Las variables de decisión de su problema de maximización de bienestar son la frecuencia, la capacidad, el número de buses, la distancia entre paraderos y la tarifa de transporte público, sumando a ello la tarifa vial y el número de pistas exclusivas para buses. También permitieron subsidios a la tarifa del modo bus, financiada con recursos externos. En su modelo, la decisión de cuánta infraestructura vial proveer es exógena; en otras palabras, está fija a los efectos prácticos.

Rizzi (2014) estudia cómo la provisión de infraestructura vial y los niveles de servicio se ven afectados dependiendo del mecanismo de financiamiento bajo el supuesto que las dos decisiones (provisión de infraestructura y tarificación) son efectuadas de manera conjunta. En este trabajo los posibles mecanismos de financiamiento fueron (i) una tarifa vial por kilómetro circulado, (ii) un impuesto a los combustibles o (iii) un impuesto al consumo generalizado. Otro elemento importante en el análisis de Rizzi (2014) fue la consideración explícita de aspectos redistributivos en la consideración de cuánta infraestructura de transporte proveer y cómo financiarla. Por último, en este trabajo se plantea un modelo de equilibrio general y, por lo tanto, el costo marginal de los fondos públicos es endógeno, a diferencia de los estudios citados anteriormente donde este costo marginal es determinado exógenamente.

El objetivo principal de esta investigación es extender el trabajo de Rizzi (2014) incluyendo un segundo modo de transporte: transporte público de pasajeros mediante buses. De esta manera, se estudia cómo diferentes mecanismos de financiamiento afectan la partición modal y los niveles de servicio por modo. Incluir un segundo modo de transporte complejiza el análisis notablemente. El financiamiento de la infraestructura vial y de la operación de servicios de transporte público puede operar a través de restricciones separadas o conjuntas; adicionalmente, también se puede considerar por separado el financiamiento del costo de capital y del costo de operación del transporte público. Así, se genera una gran cantidad de escenarios para analizar que se multiplican cuando además se permite distintos mecanismos de financiamiento, como ser cobro a usuarios, impuestos a los combustibles o impuestos al consumo. Los distintos escenarios serán analizados mediante simulación.

Este trabajo se estructura de la siguiente forma. La primera sección explica el modelo desarrollado; la segunda sección describe los escenarios a evaluar, y los resultados de la modelación se discuten en la tercera y última sección.

## 1. MODELACIÓN

En nuestro modelo, los consumidores pueden realizar un viaje de largo fijo entre dos pares de puntos a través de un arco cuya extensión es igual al largo promedio del viaje. Dentro de las opciones, están el modo transporte público (bus) y el modo automóvil. Los usuarios derivan diferentes utilidades según el modo de viaje, dado que estos modos presentan costos y tiempos totales de viaje diferentes. Por otro lado, los usuarios derivan utilidad del consumo de un bien generalizado (bien compuesto hicksiano) y de disponer de tiempo libre. Por último, el bienestar de las personas se ve afectado por la contaminación atmosférica generada por el sector transporte. A los efectos de simplificar el análisis, se adopta una función de utilidad aditiva en el uso del transporte, en el consumo, en el uso del tiempo libre y en la exposición a la contaminación: esto impone severas restricciones sobre las preferencias individuales. Solo la mayor contaminación atmosférica entrega utilidad negativa. Viajar entrega utilidad positiva, pero el mayor tiempo de viaje y el mayor gasto en transporte restan posibilidades de ocio y de consumo.

Consideramos tres tipos de consumidores distintos, con diferentes niveles de ingreso dados exógenamente; así, los usuarios no eligen cuánto trabajar. El ingreso de los usuarios determinará su elección modal y su consumo, dado que distintos tipos de usuarios presentan distintas características y preferencias, como valores subjetivos del tiempo y utilidades marginales del ingreso. En particular, se considerarán individuos de alto, medio y bajo ingreso.

Se supone la existencia de un planificador no paternalista, quien procura maximizar el bienestar social respetando las preferencias individuales. El planificador deberá decidir cuánta infraestructura vial proveer, qué nivel de servicios de buses proveer (frecuencia y capacidad) y deberá también recolectar los fondos que permitan financiar el gasto en infraestructura vial y en la provisión de los servicios de transporte público de buses. En cuanto a posibilidades de financiamiento, podrá proponer tarifas viales, impuestos a los combustibles o impuestos al consumo. Tendrá libertad en decidir también si las restricciones presupuestarias en materia de provisión de infraestructura vial y operación de buses se cumplen de manera conjunta o de manera separada. Por ejemplo, la tarifa vial podría no solo financiar la construcción de infraestructura vial sino también la compra de buses y/o la operación de estos.

El planificador también puede redistribuir bienestar, pero solo a través del mercado de transporte, eligiendo distintos mecanismos de financiamiento que permitan atender consideraciones de equidad. Nuestro planificador no puede redistribuir ingresos mediante transferencias de suma fija y tampoco puede cobrar impuesto a la renta. La máxima libertad que dispone en tal sentido es el cobro de impuestos al consumo. Por último, el modelo planteado es de equilibrio general. Tiene la ventaja que los costos marginales de los fondos públicos son endógenos, es decir, estos guardarán directa relación con el tipo de distorsión (negativa, neutra o positiva) que genere cada mecanismo de financiamiento.

## 1.1 Función de utilidad individual

Suponemos una función de utilidad que es separable, del tipo entrópica en relación al consumo de transporte<sup>1</sup>. La función de utilidad adoptada es la siguiente:

$$U^n = \alpha^n \cdot (X^n)^m - \frac{1}{\beta^n} \sum_i \delta_i^n \cdot (\ln(\delta_i^n) - \beta^n \gamma_i^n) + \pi^n L^n + \omega \bar{E} \quad (1)$$

El superíndice  $n$  indica el tipo de individuo (alto, medio o bajo ingreso) y  $U^n$  es la utilidad total percibida por el individuo.  $\alpha^n$  representa la utilidad marginal base del bien de consumo generalizado (es decir, cuando el consumo es igual a uno) y  $m$  es un exponente cuyo valor está entre 0 y 1, reflejando una utilidad marginal decreciente ( $\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} < 0$ ).  $\delta_i^n$  es la probabilidad de viajar en el modo  $i$ , donde  $i$  puede ser automóvil, bus o no viajar. El parámetro  $\beta^n$  controla la elección modal en función de la utilidad modal. Si  $\beta^n$  se acerca a cero, entonces la elección es equiproporcional, mientras que si  $\beta^n$  tiende a infinito, se elige la alternativa de mayor

---

<sup>1</sup> Con este componente entrópico, las probabilidades de elección resultan ser del tipo logit (Small, 1992)

utilidad. Además, cuanto mayor sea el valor de  $\beta^n$ , menos atractivo será viajar en relación a consumir o al tiempo de ocio.  $\gamma_i^n$  es un parámetro (constante modal) que representa la preferencia por viajar en el modo  $i$ , independientemente del costo o del tiempo de viaje de dicho modo. El parámetro  $\pi^n$  representa la utilidad marginal del tiempo de ocio.  $\omega$  es la utilidad (o desutilidad) marginal de la externalidad asociada a la calidad del aire y es igual para todos los individuos. Por último,  $\bar{E}$  representa la externalidad por contaminación atmosférica, de naturaleza no rival en el consumo. Los individuos afrontan la siguiente restricción presupuestaria:

$$p_x X^n + \delta_a^n \cdot [(p_{g1} g_1 + p_{k1}) \cdot \bar{K} + p_{cap}] + p_b \delta_b^n \bar{K} = Y^n \quad (2)$$

Los subíndices  $a$  y  $b$  representan al modo auto y al modo bus, respectivamente.  $Y^n$  es el ingreso que perciben los individuos (igual a su gasto),  $p_x$ : precio del bien de consumo generalizado,  $p_{g1}$ : el costo del combustible para vehículos livianos;  $p_{k1}$ , el costo del peaje vial por kilómetro,  $g_1$ : el rendimiento por litro del combustible para vehículos livianos,  $\bar{K}$ : largo promedio de viajes y  $p_b$  la tarifa del bus. La restricción de tiempo se escribe así:

$$L^n + t_a \delta_a^n \bar{K} + \delta_b^n \cdot (t_v + r_1 t_e + r_2 t_{acc}) + \bar{L}^n = TT \quad (3)$$

$\bar{L}^n$  es el tiempo dedicado a trabajar y  $TT$  es el tiempo total del que disponen las personas (igual para todos los tipos de individuos).  $r_1$  y  $r_2$  son factores que representan el hecho de que a las personas les desagrada más el tiempo de espera (te) y el tiempo de acceso (ta), respectivamente, que el tiempo de viaje (tv). El lado izquierdo de la ecuación representa el tiempo utilizado en ocio, trabajo y el tiempo esperado de viaje, mientras que el lado derecho es el tiempo total disponible. De esta manera, los individuos se enfrentan al siguiente problema de maximización de utilidad:

$$\max_{\{X^n, \delta_a, \delta_b, \delta_{nv}, L^n\}} \alpha^n \cdot (X^n)^m - \frac{1}{\beta^n} \sum_{i \in \{a, b, nv\}} \delta_i^n \cdot (\ln(\delta_i^n) - \beta^n \gamma_i^n) + \pi^n L^n + \omega \bar{E}$$

$$s.a: \quad p_x X^n + \delta_a^n \cdot [(p_{g1} g_1 + p_k) \cdot \bar{K} + p_{cap}] + p_b \delta_b^n \bar{K} = Y^n$$

$$L^n + t_a \delta_a^n \bar{K} + \delta_b^n \cdot (t_v + r_1 t_e + r_2 t_{acc}) + \bar{L}^n = TT$$

$$\sum_{i \in \{a, b, nv\}} \delta_i^n = 1$$

El subíndice  $nv$  representa al modo no viajar. Incluir este modo permite que la cantidad total de viajes dependa del costo de viajar.

En las ecuaciones anteriores,  $\lambda^n$  es el multiplicador de Lagrange asociado a la restricción presupuestaria de los individuos. El valor de este multiplicador se puede interpretar como la

utilidad marginal del ingreso del individuo. De la resolución del problema de optimización, se obtiene que el valor de  $\lambda^n$  estará dado por:

$$\lambda^n = \frac{m\alpha^n \cdot (X^n)^{m-1}}{p_x} \quad (4)$$

Con esta variable es posible obtener también el valor subjetivo del tiempo de los individuos ( $VST^n$ ). Para ello, la utilidad marginal del tiempo debe dividirse por la utilidad marginal del ingreso, con el fin de poder monetizar los valores. De esta forma, la expresión resultante es:

$$VST^n = \frac{\pi^n}{\lambda^n} \quad (5)$$

Por último, para obtener el valor óptimo del consumo de  $X$ , basta con reemplazar el valor de las probabilidades de viajar en cada modo en la restricción de presupuesto y despejar  $X$ .

## 1.2 Tiempos de viaje

Los tiempos de viaje dependerán del flujo de automóviles y de buses. Denominando  $N^n$  al total de personas que pertenecen a la categoría de ingreso  $n$ , el flujo de autos se puede escribir como:

$$\sum_n \delta_a^n N^n \quad (6)$$

El flujo de automóviles será la cantidad total de viajes en dicho modo. Implícitamente, el factor de ocupación de los automóviles es igual a uno; es decir, los viajes en automóvil son del tipo auto-chofer. El flujo de buses será igual a la frecuencia de este modo ( $f$ ). No obstante, dado que los buses son más grandes que los autos, un bus genera mayor congestión. Por lo tanto, la frecuencia de buses se debe multiplicar por un factor de equivalencia ( $f_{eq}$ ) que indica a cuántos autos equivale un bus. Este factor será una función del tamaño de los buses. El porte de los buses dependerá, a su vez, de su capacidad ( $k$ ).

Los tiempos de viaje en automóvil se modelarán como una función del tipo BPR (Basso y Silva, 2014; Fernández y De Cea Ingenieros, 2005; Rizzi, 2014):

$$t_a = t_0 \cdot \left( 1 + \alpha \cdot \left[ \frac{\sum_n \delta_a^n N^n + f_{eq}(k)f}{I} \right]^\beta \right) \quad (7)$$

$\alpha$  y  $\beta$  son parámetros. El parámetro  $t_0$  representa el tiempo de viaje a flujo libre.

De la expresión anterior es posible obtener también la velocidad de circulación de los vehículos ( $v$ ). En particular, ésta será igual al inverso del tiempo de viaje:

$$v = \frac{1}{t_a} \quad (8)$$

Dado que los buses deben detenerse en paraderos, su tiempo de viaje es mayor que el de los automóviles. Por simplicidad, el tiempo total de viaje en movimiento en el modo bus será igual al tiempo de viaje en automóvil multiplicado por el largo promedio de viaje, más dos componentes: uno que refleja el tiempo que toma a los pasajeros subir al bus y otro que refleja el tiempo que le toma al bus detenerse en los paraderos. De esta manera, el tiempo de viaje total en bus será:

$$t_v = \bar{K} t_a + z \cdot fo \cdot k \cdot t_s + t_p N_p \quad (9)$$

$z$  es un factor (mayor a 1) que representa cuántas veces se “renuevan” los pasajeros que llevan los buses a lo largo del viaje,  $t_p$  es el tiempo que cada bus permanece en una parada,  $fo$  es el factor de ocupación de los buses,  $t_s$  es el tiempo que demora un pasajero en subir al bus y  $N_p$  es el número de paradas que hay en el recorrido.

Para el caso del tiempo de espera de los buses, su valor dependerá del inverso de la frecuencia del servicio y de la regularidad sea el servicio. Entonces, el tiempo de espera estará dado por:

$$t_e = \frac{\varphi}{f} \quad (10)$$

$\varphi$  es un parámetro que representa la regularidad del servicio. Si éste es perfectamente regular, por ejemplo,  $\varphi$  toma un valor de 0,5. Por último, para el tiempo de acceso, se considerará que éste es constante, dado que por simplicidad no se modelará la distancia entre paraderos ni la distribución geográfica de la demanda.

### 1.3 Precio de los bienes

El precio final para el bien de consumo generalizado y para los combustibles, será igual a su costo más el impuesto que se le aplique a cada uno:

$$p_x = 1 + i_x \quad (11)$$

$$p_{gi} = c_{gi} + i_{gi} \quad (12)$$

$c_x$  y  $c_{gi}$  son los costos del bien de consumo y del combustible utilizado por el modo  $i$ , respectivamente. Estos valores representan costos marginales de producción y se supondrán iguales a los costos medios de producción. Si el impuesto  $i$  no aplica, este es igual a cero.

## 1.4 Consumo de combustible por kilómetro

El consumo de combustible por kilómetro depende de la velocidad de circulación. Dado que se están modelando calles urbanas, donde las velocidades de flujo libre suelen ser menores a 60 km/hr, el consumo de combustible por kilómetro disminuye conforme aumenta la velocidad. De esta forma, la congestión, al provocar disminuciones en las velocidades de circulación de los vehículos, produce aumentos en el consumo de combustible por kilómetro. La función de consumo de combustible por kilómetro será del tipo:

$$g_i = \left( \frac{a_i}{v} + b_i + c_i v + d_i v^2 \right) \cdot \left( \frac{p_{gi}}{p_{base\ i}} \right)^{\eta_i} \quad (13)$$

El subíndice  $i$  denota el tipo de vehículo (automóvil o bus) y  $a_i, b_i, c_i, d_i$  son parámetros de la función, dependientes del tipo de vehículo. Esta función se obtuvo de un documento del Departamento de Transporte del Reino Unido (Department of Transport, 2012) y cumple las características requeridas para los valores de  $a_i, b_i, c_i, d_i$  que se considerarán. Esto es, los parámetros de la función de consumo de combustible por kilómetro hacen que ésta sea decreciente para las velocidades consideradas en el modelo (de 0 a 60 km/hr). Por otro lado, se debe considerar el efecto que tiene el precio de los combustibles en el consumo del mismo. Al aumentar el precio de los combustibles, los usuarios y la industria automotriz responden con vehículos más eficientes con el fin de mitigar el incremento de los precios. De esta manera, la función de consumo de combustible mostrada antes se ajustó por el segundo multiplicando de la ecuación, donde  $p_{base\ i}$  es el precio base del combustible utilizado por el modo  $i$  y  $\eta_i$  es la elasticidad del consumo de combustible con respecto al precio del mismo, para el modo  $i$ . Así, es posible considerar el efecto que tiene el precio de los combustibles en el gasto de éste.

## 1.5 Funciones de costos - Infraestructura vial y Servicio de transporte público de buses

En el modelo se diferencian dos funciones de costos: una asociada a la provisión de infraestructura vial y otra relacionada con los costos de proveer el servicio de buses. El costo de proveer la infraestructura dependerá del nivel de capacidad vial, del costo unitario y del largo del segmento. Luego, el costo total estará dado por:

$$wI\bar{K} \quad (14)$$

$w$  es el costo de proveer una unidad de infraestructura vial por unidad de tiempo y por unidad de distancia y  $\bar{K}$ , que es el largo promedio de viaje, representa en este caso el largo del segmento. Amerita hacer dos observaciones al respecto. Primero, suponemos que la capacidad vial es perfectamente divisible. Segundo, los costos marginales de proveer infraestructura vial son constantes, implicando economías de escala constantes.

Para el caso de los costos del servicio de buses, éstos se pueden dividir en dos tipos: costos por unidad de tiempo (costos fijos) y costos por kilómetros circulados (costos variables u operacionales). Los primeros están relacionados con el costo de capital de los buses y otros costos fijos, como los administrativos y similares. Éstos dependerán de la cantidad de buses de los que dispone la flota y de la capacidad de los mismos. Los segundos están relacionados con los gastos operacionales, como el costo total del combustible y lubricante consumido por los buses, costos de mantenimiento, personal, etc. De esta manera, los costos totales se pueden expresar como:

$$K_b^T \cdot (p_{g2}g_2 + C_v(k) + p_{k2}) + BC_f(k) \quad (15)$$

El primer término corresponde a los costos operacionales y el segundo término corresponde a los costos fijos. La variable  $K_b^T$  representa la cantidad de kilómetros totales recorridos por los buses y  $C_v$  es una función de los costos variables por kilómetro distintos a los costos de combustible, como lo son los costos de lubricantes y mantenimiento. Esta función dependerá de la capacidad de los buses de la flota ( $k$ ).  $B$  es una variable que indica la cantidad de buses con la que cuenta la flota y  $C_f$  es una función que representa los costos fijos por unidad de tiempo por bus disponible en la flota. Esta función también dependerá de la capacidad de los buses.

## 1.6 Externalidades

La expresión que representa la externalidad ( $\bar{E}$ ) está dada por:

$$\bar{E} = g_1 \sum_n N^n \delta_a^n \bar{K} + \rho g_2 K_b^T \quad (16)$$

El nivel de la externalidad dependerá del consumo total de combustible en el modelo. El parámetro  $\rho$  es un factor que representa cuánto más contamina el combustible que utilizan los buses que el que utilizan los autos, por unidad de combustible consumido.

## 1.7 Función objetivo

El bienestar social se considerará como una suma ponderada de las utilidades de todos los individuos; en otras palabras, se adopta la función de bienestar social utilitaria. Así, el bienestar social se escribe

$$BS = \sum_n \theta^n N^n U^n \quad (17)$$

$\theta^n$  y  $N^n$  son el ponderador social y la cantidad de individuos de cada tipo, respectivamente.

## 1.8 Restricciones generales

A continuación se presentan las restricciones generales del modelo. La primera restricción guarda relación con la frecuencia del servicio de buses. La frecuencia debe ser tal que sea posible transportar a todos los usuarios que realicen un viaje en bus. Para ello, se toma en cuenta la capacidad de los buses. La cantidad máxima de pasajeros que se transporta por unidad de tiempo se obtiene al multiplicar la capacidad de los buses ( $k$ ) por la frecuencia de éstos ( $f$ ). Por simplicidad, los buses circularán con una cantidad de pasajeros igual a una fracción de la capacidad, denominado factor de ocupación ( $fo$ ). Así, la capacidad real de los buses es igual a un  $fo \cdot 100\%$  de la capacidad y, por ende, la cantidad de pasajeros por bus será igual a este valor. La restricción descrita se puede escribir como:

$$f = \frac{\sum_n N^n \delta_b^n}{fo \cdot k} \quad (22)$$

De esta expresión se deduce que al aumentar la cantidad de personas que viajan en transporte público, aumenta la frecuencia del servicio. Esto, a su vez, disminuye el tiempo de espera que perciben los usuarios del sistema (ecuación 10), el llamado efecto Mohring. De esta expresión, se obtiene la cantidad de kilómetros totales recorridos por los buses ( $K_b^T$ , utilizada en la ecuación 15, por ejemplo). Dado el factor de ocupación, la cantidad de kilómetros totales recorridos por los buses se puede expresar como:

$$K_b^T = \frac{\bar{K} \sum_n N^n \delta_b^n}{fo \cdot k} \quad (23)$$

O utilizando la restricción para la frecuencia (ecuación 22), se puede escribir también como:

$$K_b^T = \bar{K}f \quad (24)$$

La segunda restricción del problema está relacionada con la cantidad de buses requeridos para satisfacer la frecuencia elegida. Para ello, se considera el tiempo de ciclo ( $t_c$ ) de un bus cualquiera de la flota. Así, la cantidad de buses mínima que se requiere vendrá dada por:

$$B = ft_c \quad (25)$$

Al aumentar la frecuencia del sistema o el tiempo de ciclo de los buses, aumentará la cantidad de buses que se requieren para satisfacer dicha frecuencia.

La tercera restricción se refiere a la capacidad de los buses. Se decidió limitar la capacidad de los buses a los de tamaño mediano. En particular, se fijó en un máximo de 120 pasajeros por bus. De esta manera, la restricción es:

$$0 \leq k \leq 120 \quad (26)$$

La capacidad de los buses es continua y puede tomar cualquier valor entre 0 y 120.

Por último, se incluirán restricciones de no negatividad para todas las variables del problema, ya que éstas no pueden adoptar valores menores a cero:

$$\delta_i^n, X^n \geq 0 \quad \forall i, n \quad (27)$$

$$p_{k1}, p_{k2}, i_{g1}, i_{g2}, i_x \geq 0 \quad (28)$$

Las demás restricciones del problema son específicas de cada escenario y se explicarán en la subsección siguiente.

## 2. ESCENARIOS A EVALUAR

Dado que existen dos restricciones de presupuesto por parte del planificador (una en relación a la infraestructura vial y otra en relación a la empresa de buses), éstas se pueden tratar por separado o de manera conjunta. Aún más, también se puede considerar por separado el financiamiento del costo de capital y del costo de operación del transporte público.

Por último, se agregará también un escenario de referencia para tener un punto de comparación para los demás escenarios. En este caso, el nivel de infraestructura vial estará fijo. Dado que en la realidad la infraestructura vial no se financia con un cobro directo a los usuarios exclusivo para costear la provisión de dicha infraestructura, no es posible representar completamente la realidad de la ciudad de Santiago. Luego, en ningún caso se debe considerar que este escenario refleje la situación actual de esta ciudad.

A continuación se nombran y describen los distintos escenarios, los que se identificarán de aquí en adelante con el número romano mostrado al principio de cada descripción y un nombre abreviado para facilitar su comprensión (mostrado entre paréntesis al final).

### I. Peaje y restricciones separadas para los costos de infraestructura vial y del sistema de buses

En este escenario, la infraestructura vial se financia mediante una tarifa vial por kilómetro a todo tipo de vehículo (autos livianos y buses). Los costos del servicio de buses son cubiertos por la tarifa (por kilómetro) cobrada a los usuarios de este sistema. Las variables de decisión son el valor de los peajes (para automóviles y para buses), la tarifa, la frecuencia y la capacidad de los servicios de buses y el nivel de infraestructura vial.

### II. Impuesto a los combustibles y restricciones separadas para los costos de infraestructura vial y del sistema de buses

Este escenario es análogo al anterior, pero en vez de financiar la infraestructura vial con un peaje, se financia con un impuesto a los combustibles. Las variables de decisión son el valor

de los impuestos a los combustibles (para automóviles y para buses), la tarifa, la frecuencia y la capacidad de los servicios de buses y el nivel de infraestructura vial.

III. Impuesto al consumo y restricciones separadas para los costos de infraestructura vial y del sistema de buses

Este escenario es similar a los dos anteriores, pero la infraestructura vial es financiada por un impuesto al bien de consumo generalizado. Las variables de decisión son el impuesto al consumo, la tarifa, la frecuencia y la capacidad de los servicios de buses y la capacidad vial.

IV. Peaje y restricciones separadas para los costos de infraestructura vial y del sistema de buses, pero el peaje financia también los costos fijos del sistema de buses

En este escenario, la infraestructura vial se financia mediante un peaje, utilizado también para financiar los costos fijos (de capital) del sistema de buses. La tarifa cobrada a los usuarios de bus solo financia los costos operacionales del sistema. En otras palabras, una restricción de presupuesto cubre el costo de la infraestructura vial y la inversión en buses y la segunda restricción cubre los costos operativos de los buses. Ello permite subsidiar la tarifa del bus mediante cobros a los usuarios que viajan en automóvil. Las variables de decisión son las mismas del escenario I: el valor de los peajes, la tarifa, la frecuencia y la capacidad de los servicios de buses y el nivel de infraestructura vial.

V. Impuesto a los combustibles y restricciones separadas para los costos de infraestructura vial y del sistema de buses, pero el impuesto financia también los costos fijos del sistema de buses

Este escenario es similar al escenario IV, utilizando el impuesto a los combustibles como mecanismo de financiamiento de la infraestructura vial y de los costos fijos de proveer servicios de buses. Las variables de decisión son las mismas que las del escenario II, es decir, el valor de los impuestos a los combustibles, la tarifa, la frecuencia y la capacidad de los servicios de buses y la capacidad vial.

VI. Impuesto al consumo y restricciones separadas para los costos de infraestructura vial y del sistema de buses, pero el impuesto financia también los costos fijos del sistema de buses

Este escenario es igual a los dos escenarios anteriores, siendo el impuesto al bien de consumo el medio para financiar la infraestructura vial y los costos fijos del sistema de la provisión de servicios de buses. Las variables de decisión son el impuesto al consumo, la tarifa, la frecuencia y la capacidad de los servicios de buses y el nivel de infraestructura vial, al igual que en el escenario III.

VII. Peaje y una sola restricción para los costos de infraestructura vial y del sistema de buses

En este escenario, las dos restricciones de presupuesto (infraestructura vial y empresa de buses) se funden en una sola<sup>2</sup>. De esta manera, el peaje y la tarifa de los buses se utilizan para financiar simultáneamente ambos costos. Esto permite que el peaje pueda subsidiar de manera parcial o total la tarifa cobrada a los usuarios de buses o viceversa y que la tarifa de bus financie la infraestructura vial. Las variables de decisión son el peaje a cobrar a los automóviles, la tarifa, la frecuencia y la capacidad de los servicios de buses y el nivel de infraestructura vial. En este caso, el peaje a cobrar a los buses es igual a cero, dado que tal cobro se canaliza de manera directa mediante el cobro de la tarifa de bus.

### VIII. Impuesto a los combustibles y una sola restricción para los costos de infraestructura vial y del sistema de buses

Este escenario es igual al escenario anterior, pero en vez de aplicar un peaje se cobra un impuesto a los combustibles. Las variables de decisión son el impuesto al combustible que usan los autos, la tarifa, la frecuencia y la capacidad de los servicios de buses y la capacidad vial. El impuesto al combustible de los buses es nulo por defecto y el motivo es análogo al explicado en el escenario anterior.

### IX. Impuesto al consumo y una sola restricción para los costos de infraestructura vial y del sistema de buses

Este escenario es análogo a los dos anteriores, pero financiando al sistema de transporte mediante el impuesto al consumo. Las variables de decisión son el impuesto al bien de consumo, la tarifa, la frecuencia y la capacidad de los servicios de buses y el nivel de infraestructura vial.

### X. Peaje financiando el costo de la infraestructura vial e impuesto al consumo financiando costos fijos del sistema de buses

El peaje es utilizado para financiar la infraestructura vial, el impuesto al consumo financia los costos fijos del sistema de buses y la tarifa cobrada a los usuarios de bus solo cubre los costos operacionales de este sistema. En este escenario, existen tres restricciones de presupuesto. Las variables de decisión son los peajes a cobrar a ambos modos de transporte, el impuesto al bien de consumo, la tarifa, la frecuencia y la capacidad de los servicios de buses y el nivel de la capacidad vial.

### XI. Escenario referencial: Impuesto a los combustibles e impuesto al consumo financiando los costos de la infraestructura vial y tarifa de bus para financiar la operación de los buses. Existen restricciones separadas para los costos de la infraestructura y el servicio de buses y la provisión de infraestructura vial está fija.

---

<sup>2</sup> Este escenario supone que las agencias encargadas de la vialidad y del transporte público trabajan de manera conjunta o coordinada o incluso que se trate de una sola agencia encargada de ambos asuntos. Esto podría llegar a ser conflictivo o poco realista. De todas maneras, analizar esta posibilidad enriquece el análisis.

El impuesto al consumo y el impuesto a los combustibles son utilizados para financiar la infraestructura vial (cuyo nivel es fijo), aunque el valor del impuesto a los combustibles sólo puede variar entre 0 y el valor actual que tiene este impuesto en la ciudad de Santiago. Los costos del sistema de buses son financiados por la tarifa cobrada a los usuarios de bus. En este caso las variables de decisión son los impuestos a los combustibles para ambos modos, el impuesto al bien de consumo, la tarifa, la frecuencia y la capacidad de los servicios de buses.

## 2.1 PARÁMETROS E IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL DEL MODELO

Los parámetros utilizados en la implementación de los modelos simulados se muestran en el anexo. La razón de la selección de cada uno de estos valores está en Pavón (2017).

El modelo fue escrito en el lenguaje de programación AMPL (*A Mathematical Programming Language*) y resuelto mediante el *solver* para problemas no lineales de optimización Knitro, del desarrollador Artelys®. Se eligió este *solver* por su facilidad de manejo e implementación y por las útiles opciones de optimización que presenta. Una de ellas es la opción “*Multistart*”, la que permite generar múltiples puntos de partida para poder encontrar de manera más rápida el resultado óptimo de los problemas de optimización.

## 3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La siguiente tabla entrega un resumen de los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios simulados. Los resultados mostrados cubren los aspectos, a nuestro entender, más relevante del análisis.

**TABLA 1:** Resultados de las simulaciones

Variable/Escenario	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	REF
<b>Infraestructura (veh/hr)</b>	3.340	3.417	5.604	2.363	2.343	5.131	2.363	2.204	5.063	2.901	3.600
<b>Tarifa bus (\$/km)</b>	32	33	36	13	14	5	13	12	0	4	54
<b>Velocidad automóviles (km/hr)</b>	47	47	42	46	47	43	46	46	43	46	16
<b>Velocidad buses (km/hr)</b>	25	25	24	24	25	26	24	24	26	25	12
<b>Grado de saturación</b>	0,68	0,66	0,76	0,69	0,67	0,76	0,69	0,68	0,76	0,68	1,06
<b>Frecuencia (buses/hr)</b>	42	42	14	48	51	27	48	49	29	48	11
<b>Capacidad (pax/bus)</b>	86	86	74	94	90	59	94	94	58	85	110
<b>Peaje buses (\$/km)</b>	0	-	-	632	-	-	0	-	-	0	-
<b>Peaje autos (\$/km)</b>	137	-	-	176	-	-	176	-	-	137	-
<b>Impuesto a X (\$/unidad)</b>	-	-	0,099	-	-	0,098	-	-	0,098	0,015	0,041
<b>Impuesto al combustible buses (\$/L)</b>	-	331	-	-	2.417	-	-	0	-	-	0
<b>Impuesto al combustible autos (\$/L)</b>	-	2.161	-	-	2.811	-	-	2.916	-	-	300
<b>Consumo X ingreso alto (unidades)</b>	18.525	18.510	17.627	18.654	18.670	17.690	18.654	18.697	17.694	18.445	18.349
<b>Consumo X ingreso medio (unidades)</b>	8.132	8.124	7.500	8.557	8.574	7.623	8.557	8.633	7.643	8.353	7.677
<b>Consumo X ingreso bajo (unidades)</b>	5.119	5.113	4.393	5.417	5.416	4.601	5.417	5.453	4.637	5.335	4.486
<b>% Auto ingreso alto</b>	75%	75%	96%	62%	60%	92%	62%	58%	92%	70%	89%
<b>% Auto ingreso medio</b>	39%	39%	87%	22%	21%	79%	22%	19%	78%	31%	80%
<b>% Auto ingreso bajo</b>	13%	13%	66%	6%	5%	54%	6%	5%	52%	10%	54%
<b>% Bus ingreso alto</b>	23%	23%	4%	36%	38%	7%	36%	40%	8%	29%	3%
<b>% Bus ingreso medio</b>	57%	58%	12%	74%	76%	20%	74%	78%	21%	66%	12%
<b>% Bus ingreso bajo</b>	78%	78%	31%	87%	87%	43%	87%	88%	45%	84%	36%

<b>Variable/Escenario</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>VI</b>	<b>VII</b>	<b>VIII</b>	<b>IX</b>	<b>X</b>	<b>REF</b>
<b>% No viajar ingreso alto</b>	1,8%	1,8%	0,4%	2,3%	2,4%	0,4%	2,3%	2,5%	0,4%	1,6%	7,9%
<b>% No viajar ingreso medio</b>	3,4%	3,4%	0,9%	3,4%	3,4%	0,8%	3,4%	3,4%	0,8%	2,5%	7,8%
<b>% No viajar ingreso bajo</b>	8,6%	8,8%	3,7%	7,1%	7,1%	3,0%	7,1%	7,0%	2,9%	5,8%	10,0%
<b>Bienestar social</b>	116.447	116.403	113.563	116.750	116.741	114.456	116.750	116.738	114.581	116.726	105.994
<b>Bienestar personas ingresos altos</b>	57.694	57.690	55.757	57.372	57.364	55.943	57.372	57.292	55.959	57.316	52.472
<b>Bienestar personas ingresos medios</b>	34.852	34.835	34.454	34.984	34.993	34.726	34.984	34.997	34.765	35.031	31.489
<b>Bienestar personas ingresos bajos</b>	23.902	23.878	23.352	24.394	24.384	23.787	24.394	24.449	23.858	24.379	22.033
<b>Externalidad (desutilidad)</b>	-1.633	-1.620	-2.866	-1.250	-1.225	-2.681	-1.250	-1.170	-2.650	-1.481	-4.000

Escenarios:

I: Peaje y restricciones separadas para los costos de infraestructura vial y del sistema de buses

II: Impuesto a los combustibles y restricciones separadas para los costos de infraestructura vial y del sistema de buses

III: Impuesto al consumo y restricciones separadas para los costos de infraestructura vial y del sistema de buses

IV: Peaje y restricciones separadas para los costos de infraestructura vial y del sistema de buses, pero el peaje financia también los costos fijos del sistema de buses

V: Impuesto a los combustibles y restricciones separadas para los costos de infraestructura vial y del sistema de buses, pero el impuesto financia también los costos fijos del sistema de buses

VI: Impuesto al consumo y restricciones separadas para los costos de infraestructura vial y del sistema de buses, pero el impuesto financia también los costos fijos del sistema de buses

VII: Peaje y una sola restricción para los costos de infraestructura vial y del sistema de buses

VIII: Impuesto a los combustibles y una sola restricción para los costos de infraestructura vial y del sistema de buses

IX: Impuesto al consumo y una sola restricción para los costos de infraestructura vial y del sistema de buses

X: Peaje financiando el costo de la infraestructura vial e impuesto al consumo financiando costos fijos del sistema de buses

REF: Escenario referencial: Impuesto a los combustibles e impuesto al consumo financiando los costos de la infraestructura vial, tarifa de buses y restricciones separadas para los costos de la infraestructura y el servicio de buses. La infraestructura vial se supone fija en una capacidad de 3.600 vehículos por hora.

Los resultados de nuestro análisis de simulación deben ser interpretados de manera cualitativa o referencial. La relevancia de este análisis consiste en entender cómo se ve afectada la provisión de infraestructura vial, los niveles de servicio, las particiones modales, la equidad y las externalidades de transporte ante diferentes esquemas de financiamiento bajo los supuestos implícitos en los parámetros adoptados en estas simulaciones.

Las simulaciones muestran que la capacidad vial varía notablemente entre escenarios. Cuanto más disociado está el uso de la infraestructura vial del pago por su uso (Escenarios III, VI y IX), mayor será la necesidad de construir vialidad. En estos tres escenarios, la infraestructura vial se financia mediante impuestos al consumo. Por otro lado, cuánto más se cobre por el uso de la vialidad y más se subsidie el transporte público, menor será la necesidad de construir infraestructura vial.

El impuesto a los combustibles producirá un nivel de infraestructura vial mayor o menor al que produce la tarifa vial, dependiendo de dos efectos. El primer efecto está relacionado con el fenómeno '*'fuel economics'*': el impuesto a los combustibles puede ser evadido de manera parcial recurriendo a vehículos más eficientes. Ello hace que en comparación a una tarifa vial este cobro resulte ser más caro por kilómetro circulado y, por lo tanto, será pagado voluntariamente por los conductores si el nivel de servicio aumenta, lo que produce un nivel de infraestructura mayor al óptimo. El segundo efecto se debe a que al encarecerse el uso de la vialidad por el cobro del impuesto al combustible hay un trasvase de pasajeros hacia el bus, que lleva a una menor demanda de infraestructura vial. Si el primer efecto se impone, se tendrá un mayor nivel de infraestructura vial que el observado cuando se cobra una tarifa vial; y viceversa si el segundo efecto se impone. Este segundo efecto tiende a dominar en aquellos escenarios en que el impuesto al combustible financia parcialmente o totalmente la operación de los buses.

El nivel de servicio en nuestro estudio se entiende como velocidad de circulación de automóviles particulares y buses, y frecuencia y capacidad de los buses. En primer lugar, destaca la poca variabilidad de las velocidades de circulación de los automóviles y de los buses, sobre todo considerando que en los diferentes escenarios los niveles de capacidad vial son bien disímiles. Con impuestos a las bencinas, las velocidades de circulación son marginalmente mayores. En cuanto a las frecuencias de los buses, destacan los escenarios III, VI y IX por los altos tiempos de espera y los buses de menor capacidad. En estos tres escenarios, la partición modal está muy volcada al uso del automóvil.

Desde el punto de vista de las personas de menores ingresos, el escenario en el que alcanzan su mayor bienestar es el número VIII, en donde el impuesto a los combustibles y la tarifa de bus financian de manera simultánea la infraestructura vial y el costo de los buses. Este esquema de financiamiento permite subsidios cruzados entre automovilistas y usuarios de bus, encareciendo el uso del automóvil y contribuyendo a un bajo nivel de contaminación que redunda en mayor bienestar para toda la población. En este escenario las personas de ingreso medio también se ven beneficiadas. En este caso, el efecto Mohring (o economías de escala social) ha sido totalmente agotado: se tienen frecuencias altas en las que los tiempos de espera son muy bajos.

Cuando se recurre a un impuesto al bien de consumo generalizado para el financiamiento de

servicios de transporte (escenarios III, VI y IX), ocurren dos efectos perniciosos. Por un lado, existe una disociación entre uso y pago, de manera tal que se incentiva un sobreconsumo de transporte. Por otro lado, aumenta el costo de consumir el bien de consumo generalizado por la aplicación del impuesto. Esto genera una importante pérdida de bienestar social producida por la brecha existente entre el precio de venta y el costo marginal del bien generalizado. En nuestro modelo, además, se produce un tercer efecto negativo: un incremento de contaminación atmosférica. Curiosamente las velocidades de circulación no caen de manera importante: en estos escenarios se construye mayor capacidad vial. Esto sugiere que, en estos casos, las ciudades tendrán un exceso de vialidad en comparación a si la infraestructura de transporte se financiase con cargo directo a usuarios, sin generar ello aumento alguno del bienestar social ni aumento de bienestar de las personas de más bajos ingresos.

El mensaje más relevante de este análisis desde el punto de vista de la equidad es el siguiente: si se quiere hacer redistribución de bienestar a través del transporte urbano, el uso del vehículos privado debe ser tarificado mediante peaje o impuesto a las bencinas y los subsidios deben ser aplicados solo para financiar el uso del transporte público, ya sea mediante mayores tarifas viales o mayores impuestos a las bencinas automovilistas o mediante el impuesto al consumo. De esta manera, se desincentiva el uso del auto privado, se construye menos vialidad, se agota el efecto Mohring, mejora la calidad del aire y las personas de ingresos bajos y medios ven incrementado su bienestar.

En cuanto a las principales limitaciones del modelo, se tienen las siguientes:

- No se considera un mercado laboral, por lo tanto los individuos no pueden elegir cuánto trabajar y ello lleva a no poder considerar el impuesto a la renta como un mecanismo de financiamiento de la infraestructura vial<sup>3</sup>. Y al no considerar el mercado laboral, tampoco podemos tratar beneficios por economías de aglomeración.

A nivel más de detalle:

- Se supone un patrón de preferencias separables restrictivo, que no permite interacción entre transporte y el tiempo de ocio;
- El modelo de tráfico considerado es muy simple. Tampoco se modela la congestión que existe en las paradas del transporte público, ni se considera el distanciamiento entre los mismos paraderos o la distribución geográfica de la demanda.

---

<sup>3</sup> En Chile, el ingreso presupuestario por IVA domina al ingreso presupuestario por ingreso a la renta. En las proyecciones presupuestarias para el año 2017, se recolectarán cinco pesos mediante el IVA por cada cuatro pesos a recolectar a través del impuesto a la renta (DIPRES, 2017). Esta relación es diferente a la que se observa en varios países de mayor desarrollo económico donde el impuesto a la renta domina a los ingresos por IVA.

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece el apoyo financiero del proyecto FONDECYT 1170903, del Instituto Sistemas Complejos en Ingeniería (ICM:P-05-004-F) y de CONICYT/FONDAP/15110020.

## **REFERENCIAS**

- Basso, L. y Silva, H. (2014) Efficiency and Substitutability of Transit Subsidies and Other Urban Transport Policies. *American Economic Journal: Economic Policy* 6(4), 1-33.
- D'Ouville, E. L. y McDonald, J. F. (1990) Optimal road capacity with a suboptimal congestion toll. *Journal of Urban Economics* 28, 34-49.
- De Palma, A. y Lindsey, R. (2004) Congestion pricing with heterogeneous travelers: a general-equilibrium welfare analysis. *Networks and Spatial Economics* 4, 135–60.
- Department of Transport, UK (2012) Values of time and vehicle operating costs. TAG Unit 3.5.6.
- DIPRES (2017) Ley de Presupuesto del Sector Público Año 2017. [http://www.dipres.gob.cl/572/articles-149470\\_Ley\\_de\\_Presupuestos\\_2017\\_V2.pdf](http://www.dipres.gob.cl/572/articles-149470_Ley_de_Presupuestos_2017_V2.pdf)
- Fernandez y De Cea Ingenieros (2005) Análisis y actualización del modelo ESTRAUS, Informe Ejecutivo. Final Report for Secretaría Interministerial de Planificación de Transporte (SECTRA). Santiago, Chile.
- Mayeres, I., y Proost, S. (2001) Marginal tax reform, externalities and income distribution. *Journal of Public Economics*, 79(2), 343-363.
- Mohring, H. (1974) Pricing and Transportation Capacity. *Transportation Research Board Special Report*, 183-195.
- Mohring, H., y Harwitz, M. (1962) Highway benefits: An analytical framework.
- Newberry, J. (2005) Why tax energy? Towards a more rational energy policy. *Economic Journal*, 26(3), 1-40.
- Pavón, Nicolás (2017) Tarificación y Provisión de Infraestructura Vial y Servicios de Transporte Público: El Impacto de Diferentes Mecanismos de Financiamiento. Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Parry, I. W. y Small, K. A. (2005) Does Britain or the United States have the right gasoline tax? *The American Economic Review*, 95(4), 1276-1289.

Parry, I. W. y Small, K. A. (2009) Should Urban Transit Subsidies Be Reduced? *American Economic Review*, 99(3): 700-724.

Parry, I. W., & Timilsina, G. R. (2010) How should passenger travel in Mexico City be priced? *Journal of Urban Economics*, 68(2), 167-182.

Pines, D. y Sadka, E. (1981) Optimum, second best, and market allocations of resources within an urban area. *Journal of Urban Economics* 9, 173-189.

Rizzi, L. I. (2014) Simple model of road infrastructure financing: the impact of different road user charges. *Journal of Transport Economic and Policy* 48, 35-51.

Verhoef, E. T., & Small, K. A. (2004) Product differentiation on roads. *Journal of Transport Economics and Policy (JTEP)*, 38(1), 127-156.

Walters, A. A. (1968) *The economics of road user charges*. Washington, DC: International Bank for Reconstruction and Development.

Wheaton, W. C. (1978) Price-induced distortions in urban highway investment. *The Bell Journal of Economics* 9, 622-632.

Wilson, J. D. (1983) Optimal road capacity in the presence of unpriced congestion. *Journal of Urban Economics* 13, 337-357.

## ANEXO

**Tabla A-1:** Valores de los parámetros asociados a los individuos

Parámetro	Ingreso bajo	Ingreso medio	Ingreso bajo
$\alpha^n$	0,01192	0,01163	0,01064
$\beta^n$	1	1	1
$\gamma_a^n$	5	7,2	8,1
$\gamma_b^n$	3,6	6,5	7,8
$\gamma_{nv}^n$	0	0	0
$\pi^n$	0,0178	0,0661	0,1011
$\omega$	-0,00025	-0,00025	-0,00025
$m$	0,8	0,8	0,8
$Y^n$ (\$/12h)	5.700	9.300	20.500

**Tabla A-2:** valores de los parámetros generales del modelo

Parámetro	Valor
$N_p$	20
$t_s$ (s)	16,8
$\alpha$	1,447
$\beta$	7,644
$t_0$ (m)	1
$\varphi$	0,5
$t_{acc}$ (m)	6,3
$z$	1,42
$c_{g1}$ (\$/l)	302
$c_{g2}$ (\$/l)	270
$c_x$ (\$/unidad)	1
$w$ (\$/km / veh/h)	89
$fo$	0,75
$\rho$	2
$\bar{K}$	10
$p_{cap}$ (\$/viaje_auto)	960
$\eta_a$	-0,2
$\eta_b$	-0,2
$a_a$	0,964022581
$b_a$	0,041448033
$c_a$	-0,0000454163
$d_a$	0,00000201346

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
$a_b$	4,115603124
$b_b$	0,306464813
$c_b$	-0,00420643
$d_b$	0,0000365263