

Escuela de Economía y Finanzas

# Documentos de trabajo

## Economía y Finanzas

Centro de Investigación  
Económicas y Financieras

No. 16-22  
2016

### **Congestión vehicular en Medellín: una posible solución desde la Economía**

*John J. García, Carlos E. Posada, Alejandro Corrales*



# Congestión vehicular en Medellín: una posible solución desde la Economía

John J. García\*  
Carlos Esteban Posada\*\*  
Alejandro Corrales<sup>§</sup>

Agosto, 2016

## Abstract

According to the Economic theory, prices are the most accurate mechanism to solution the traffic congestion problem in urban areas. This article presents a diagnosis on the mobility issue in the city of Medellín (Colombia) and a solution is proposed based on Economic theory. The household expenditures in transportation and the choice between public and private transport were analyzed through the method of elasticity. Evidence has been found proving that the prices mechanism is an efficient mechanism to disincentive the usage of private vehicles, since a rise in the expenditure in transport (due to an hypothetic intra-urban toll) results in a lower probability to use private vehicle and a higher probability to use public transportation.

## Resumen

Según la teoría económica el mecanismo de precios es una herramienta adecuada para solucionar el problema de congestión vehicular. El objetivo de este artículo es diagnosticar el grado de congestión vehicular de la ciudad de Medellín (Colombia) y proponer alternativas que den solución a dicho problema desde la óptica de la teoría económica. A diferencia de otros estudios, esta investigación analizó la relación entre el gasto de las familias en transporte y la elección de transporte (público o privado) a través la metodología de elasticidades. Se encontró evidencia a favor de la hipótesis de los precios como mecanismos para desincentivar el uso del automóvil privado, pues a medida que aumenta el nivel de gasto en transporte (asociado a un supuesto peaje urbano), la probabilidad de usar transporte privado disminuye, mientras que la probabilidad de utilizar transporte público aumenta.

**Palabras claves:** congestión vehicular, peaje por congestión, modelo Logit multinomial, elasticidad gasto.

*Classification JEL:* H23, R41, R48.

---

\* PhD en Economía, Profesor Escuela de Economía y Finanzas, Universidad EAFIT, Colombia. AA 3300 Medellín (Colombia). Phone: (+574)2619549, Fax: (+574)2664284. E-mail: jgarcia@eafit.edu.co.

\*\* Profesor Escuela de Economía y Finanzas, Universidad EAFIT, Colombia. AA 3300 Medellín (Colombia). Phone: (+574)2619549, Fax: (+574)2664284. E-mail: cposad25@eafit.edu.co.

§ Magister en Economía, Universidad EAFIT, E-mail: acorral5@eafit.edu.co.

## 1. Introducción

Ha sido usual que el desarrollo económico y demográfico de las naciones vaya acompañado del crecimiento de sus ciudades y de una complejidad creciente de las modalidades y condiciones del transporte urbano. Con todo, el mismo avance económico ha hecho menos difícil la implementación de soluciones a los problemas de congestión vehicular urbana.

Las principales variables utilizadas para la medición de los costos de congestión vehicular son la magnitud y el costo de oportunidad del tiempo de los usuarios para sus desplazamientos, y el grado de contaminación ambiental. El costo de oportunidad es la valoración del tiempo de esparcimiento sacrificado o de los ingresos dejados de percibir a causa de la congestión. Cuando la congestión vehicular es significativa, el costo social es superior a la suma de los costos individuales soportados por los usuarios del transporte privado y público, pues, en este caso, hay una externalidad (un efecto negativo externo): quienes no se transportan en vehículos desde o hacia sus residencias también padecen los efectos negativos de las pérdidas de tiempo y de la contaminación por ruido y por respiración de gases tóxicos (Parry, Walls, & Harrington, 2011), y quienes se transportan en vehículos también padecen tales efectos, aún si estas mismas personas contribuyen a agravarlos.

La congestión vehicular es un problema que han enfrentado las grandes ciudades en diferentes continentes. Algunas han utilizado mecanismos tributarios (impuestos pigovianos, que, en este caso, denominamos peajes urbanos) para reducir la congestión, en vista de que otros mecanismos (como las prohibiciones de circulación de vehículos en ciertas zonas o en ciertas horas o días, etc.) se han considerado insuficientes al respecto.

Algunas ciudades donde se ha establecido el mecanismo de los peajes urbanos son Londres, Singapur, Estocolmo y Chicago; al mismo tiempo, sus autoridades han promocionado el uso alternativo de transporte público y no motorizado, y mejorado la infraestructura necesaria para ello. Una buena gestión y la asignación de los ingresos obtenidos del peaje de congestión han hecho más factible la implementación de dicha infraestructura.

En los casos de Medellín y de otras principales ciudades colombianas, cuatro factores han incrementado el número de vehículos en circulación y la congestión actual: los rápidos avances de la urbanización, el aumento del ingreso real *per cápita*, la reducción del precio real de los automotores y el mayor acceso a créditos de compra de vehículos (Medina y Vélez, 2011). Esto ha hecho que se hayan incrementado los niveles de contaminación del aire y el tiempo de transporte requerido para recorrer un mismo número de kilómetros. En el caso de Medellín, entre 2005 y 2012 este tiempo se incrementó en un 32% (*Área Metropolitana del Valle de Aburrá Movilidad*, 2012).

Este artículo tiene como objetivo presentar un diagnóstico del nivel de congestión vehicular en Medellín y analizar alternativas económicas de solución de este problema. En nuestro diagnóstico utilizamos un modelo de elección discreta, específicamente un “Logit multinomial”, que toma como punto de partida suponer que los agentes eligen entre diferentes modos de transportarse como tren urbano (“Metro”), automóvil privado, bus u otro medio de transporte. A diferencia de la gran mayoría de estudios existentes sobre

congestión vehicular, que utilizan la metodología de preferencias reveladas (declaradas), el reportado en el presente documento utilizó la metodología de estimación de la “elasticidad gasto de la demanda” para analizar la sensibilidad de la demanda de transporte de un individuo representativo ante un aumento eventual del gasto en transporte en el caso de Medellín de acuerdo con la información de la Encuesta de Calidad de Vida (del Departamento Nacional de Estadística, DANE), y, en particular, medir su disponibilidad a cambiar o sustituir entre los diferentes modos alternativos de transporte para realizar sus desplazamientos.

Uno de los principales resultados establece que si bien el indicador de congestión vehicular de Medellín está muy por debajo del correspondiente a la ciudad más congestionada del mundo, Ciudad de México, que presenta un 59% más de tiempo para desplazarse en las horas más congestionadas (pico) frente a las menos congestionadas (valle), está por encima del indicador correspondiente a ciudades que ya han implementado peajes urbanos por congestión, como es el caso de Singapur, Estocolmo y Chicago, cuyo porcentaje de exceso de tiempo en las horas pico corresponde a 31%, 29% y 26%, respectivamente. Es importante anotar que Chicago presenta el menor nivel de congestión entre las ciudades de la muestra, y en la actualidad se encuentra implementado medidas para disminuir el nivel de tiempo utilizado para desplazarse en las horas pico.

Otro resultado importante de nuestro estudio es que la probabilidad de utilizar el transporte privado (automóvil) disminuye mientras que la probabilidad de utilizar transporte público (principalmente bus) aumenta cuando se simula la implementación de un peaje urbano, haciendo el supuesto (casi obvio) de que el peaje urbano implicaría un incremento en el gasto correspondiente a transporte privado.

Además de esta introducción el documento tiene las siguientes secciones: la segunda realiza una caracterización de la congestión vehicular en Medellín y calcula una medida (aproximada) de congestión comparando el tiempo de desplazamiento entre horas pico y valle, y la contrasta con referentes internacionales; la tercera se concentra en el marco teórico al presentar el efecto de la implementación de un impuesto pigoviano, hacer una revisión de los lineamientos teóricos relacionados con el tema de estudio y presentar un resumen de las experiencias de Londres, Singapur, Estocolmo, México y Chicago; la cuarta presenta la metodología a utilizar; la quinta hace un recuento de nuestro conjunto de información; la sexta describe y analiza los principales resultados de la evidencia empírica y, por último, la séptima presenta las conclusiones.

## **2. Caracterización de la congestión vehicular en Medellín**

La ciudad de Medellín es la capital del departamento de Antioquia y es la segunda ciudad más importante de Colombia después de Bogotá; cuenta con una extensión de 105 kms<sup>2</sup> de suelo urbano, 270 kms<sup>2</sup> de suelo rural, 2121 kms de carreteras y 5,2 kms<sup>2</sup> de suelo para expansión. En el caso de Medellín (y en el de otras principales ciudades colombianas), cuatro factores se encuentran, al parecer, entre los principales determinantes del incremento en el número de vehículos que circulan allí y la congestión actual: los altos índices de urbanización, el aumento del ingreso real *per cápita*, la reducción del precio real de los

automotores y la mayor facilidad de acceder a créditos de compra de vehículos (Medina y Vélez, 2011). Derivado de ello, los niveles de contaminación y el tiempo de transporte requerido para recorrer un cierto número de kilómetros se han incrementado sustancialmente.

Para poder caracterizar el problema de congestión que hay en la ciudad es necesario analizar diferentes indicadores que permitan dar cuenta de ello. Estos indicadores son la tendencia de crecimiento del parque automotor, el tiempo de viaje promedio en la ciudad y la inversión en infraestructura en el sector transporte.

El primer aspecto que se analiza es el relativo al parque automotor, ya que el número de automóviles y motocicletas que circulan en la ciudad influye directamente en la generación de situaciones de congestión vehicular. De acuerdo con la información presentada en la Tabla 1 el parque automotor circulante estimado en la ciudad de Medellín presenta una tendencia creciente, pues pasó de 700.000 vehículos privados (sin contar taxis) en 2007 a 1'234.946 en 2014, siendo los años 2009 y 2010 los que presentaron las tasas de crecimiento más altas: 11,3% y 9,6% respectivamente (*Medellín Cómo Vamos*, 2012, 2014a).

Simultáneamente con el crecimiento en el parque automotor se presentó un cambio en la composición de este. Desde 2007 hasta 2011 hubo una marcada supremacía en la cantidad de carros en comparación con la de motos; sin embargo, en 2012 cambió la tendencia en este comportamiento, ya que el número de motocicletas pasó a tener mayor participación en el número total de vehículos circulantes en la ciudad. Así, en 2014 el parque automotor particular (vehículos privados) estuvo compuesto por 620.612 motocicletas y 614.334 automóviles.

**Tabla 1 Medellín. Parque automotor privado (sin taxis) circulante estimado: 2007-2014**

Año	Total	% Crecimiento	Motos	% Crecimiento	Automóviles	%Crecimiento
2007	700000	-	300000	-	400000	-
2008	767548	9,60	337477	12,50	430071	7,50
2009	854473	11,30	386941	14,70	467532	8,70
2010	936365	9,60	437270	13,00	499095	6,80
2011	1018257	8,70	487600	11,50	530657	6,30
2012	1100148	8,00	562219	15,30	537929	1,40
2013	1181817	7,40	588258	4,60	593559	10,30
2014	1234946	4,50	620612	5,50	614334	3,50
<b>2007-2014</b>	<b>534946</b>	<b>76,42</b>	<b>320612</b>	<b>106,87</b>	<b>214334</b>	<b>53,58</b>

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del informe Calidad de Vida Medellín 2012 y 2014

Por otro lado, de acuerdo con la Encuesta Origen Destino (EOD) 2012, cerca de 50% de los automóviles del Valle de Aburrá se encuentran concentrados en cuatro zonas del Área Metropolitana. La comuna de El Poblado, con 20% del total de automóviles de la ciudad, es la que más aporta a este rubro, seguida por Laureles, Belén y Envigado. En promedio cada una de estas zonas participa con 10% de automóviles de la ciudad. Además, si se tiene en cuenta que, según la EOD 2012, 47% de los viajes realizados en la ciudad tienen como motivo el regreso a casa, se puede intuir que estas zonas, en especial la de El Poblado, deben presentar los mayores problemas de congestión vehicular, fundamentalmente en la hora pico de la tarde.

El segundo aspecto a tener en cuenta es el tiempo de viaje promedio en la ciudad, ya que, según de Rus Mendoza, Méndez y Merchán (2003), el tiempo de viaje es uno de los principales determinantes de la demanda individual de transporte, pues representa el costo de oportunidad de estar en las calles en comparación con el tiempo que puede ser destinado a ocio o trabajo. Adicional a esto, el tiempo de viaje resulta ser la principal manera en que los viajeros perciben la congestión, ya que aumentos significativos en el tiempo de sus recorridos cotidianos están relacionados con el incremento de vehículos en las vías.

De acuerdo con los datos del documento *Área Metropolitana del Valle de Aburrá Movilidad (2012)*, basados en la EOD 2012, el tiempo promedio de viaje en septiembre de ese año en el Valle de Aburrá fue de 33 minutos, un 32% más alto que el del año 2005, cuando era de 25 minutos. Por otra parte, *Medellín Cómo Vamos (2014)*, en su informe de percepción ciudadana, destaca el aumento del porcentaje de personas que declaran incrementos del tiempo de viaje en sus recorridos habituales, pasando de 21% de los encuestados en 2013 a 41% en 2014.

La inversión en infraestructura es otro de los elementos a tener en cuenta para caracterizar un problema de congestión vehicular. En este caso utilizamos las cifras de inversión en infraestructura de transporte. Acorde con lo presentado en el documento de *Medellín Cómo Vamos (2014a)* el ítem de transporte fue el segundo con mayor inversión en la ciudad, pues significó 15,7% del total invertido (\$735.824 millones de \$4,7 billones), siendo superado

únicamente por la inversión realizada en el sector de educación. Ahora bien, en comparación con las grandes ciudades de Colombia, Medellín es la segunda ciudad del país que más invirtió en el sector transporte; sin embargo, se ubica en primer lugar si la inversión se mira en términos *per cápita*. Los recursos fueron destinados principalmente al mejoramiento del sistema de transporte masivo, seguido por inversión en estudios y pre-inversión en infraestructura, construcción de vías, mejoramiento y rehabilitación de vías, planes de tránsito y, por último, infraestructura para transporte no motorizado (Tabla 2). De esta inversión realizada en el sector transporte se destacan dos grandes rubros: en primer lugar están las obras del Metroplus (sistema de buses complementario del Metro), las cuales pertenecen al ítem de transporte masivo; en segundo lugar están las obras de valorización en el sector de El Poblado y la construcción del puente de la Madre Laura, que hacen parte de la inversión destinada a la creación de nuevas vías.

A pesar de que las inversiones en el sistema de transporte masivo (Metroplus) y construcción de nuevas vías han representado el mayor gasto en infraestructura del sector transporte, la calidad de la malla vial se ha visto disminuida en los últimos años. En efecto, el porcentaje de calles en estado deficiente ha pasado de ser 21,9% en el año 2012 a 33,5% en el año 2014 (*Medellín Cómo Vamos*, 2014a), lo cual es preocupante debido a que el parque automotor sigue creciendo y la ciudad se sigue expandiendo.

**Tabla 2. Inversión en transporte *per cápita* en Medellín (valores en millones de pesos de 2014)**

<b>Principales rubros</b>	<b>2012</b>	<b>%</b>	<b>2013</b>	<b>%</b>	<b>2014</b>	<b>%</b>
<b>Ampliación</b>						
Construcción de vías	31.165		46.774		21.289	
Sistema de transporte masivo	50.310		84.908		217.887	
Infraestructura para transporte no motorizado	2		623		5.634	
Estudios y pre-inversión en infraestructura	36.757		9.703		30.412	
Subtotal	118.23					
	4	<b>89%</b>	142.008	<b>80%</b>	275.222	<b>93%</b>
<b>Mantenimiento</b>						
Mejoramiento y rehabilitación de vías	5.173		9.023		2.973	
Mantenimiento rutinario y periódico de vías	454		17.108		12.804	
Planes de tránsito, educación, dotación de equipos y seguridad vial	8.897		8.651		5.770	
Subtotal	14.524	<b>11%</b>	34.782	<b>20%</b>	21.547	<b>7%</b>
<b>Total</b>	132.75	<b>100</b>		<b>100</b>		<b>100</b>
	8	<b>%</b>	176.790	<b>%</b>	296.769	<b>%</b>

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos del informe Calidad de Vida Medellín 2012 y 2014*

En resumen, los tres indicadores señalan un agravamiento del problema: el parque automotor sigue creciendo, aumenta el tiempo de viaje, y la infraestructura es cada vez

menos eficiente. Al respecto, cabe citar a de Rus Mendoza, Méndez y Merchán, (2003: pp 121) :

*La congestión se produce cuando, como consecuencia de las limitaciones de capacidad de alguna infraestructura, la presencia de usuarios adicionales hace aumentar los costes (principalmente, de tiempo) que soportan la totalidad de los usuarios de la infraestructura.*

Dada la limitación de la infraestructura, la medida de racionamiento físico de su uso por la vía de permisos-restricciones a la circulación de vehículos privados impuestos por las autoridades locales (y denominada “Pico y placa”) ha sido uno de los mecanismos utilizados en Medellín para amortiguar los problemas de congestión vehicular específicamente en las horas pico (que comprendían inicialmente los horarios de 6:00 am a 9:00 am y de 5:00 pm a 7:00 pm, las cuales fueron reducidas en la actualidad entre las 7:00 am y 8:30 am, y 5:30 pm y 7:00 pm.) De acuerdo con González-Calderón (2009) y González-Calderón, Henao y Sánchez-Díaz (2012), la medida es pertinente en el corto plazo pero poco efectiva en el mediano y largo plazo, debido a que la restricción de circulación para un número determinado de vehículos durante dos días en la semana en los horarios mencionados ha incentivado a los ciudadanos a adquirir más vehículos, lo que ha aumentado el número de automóviles y de motos que circulan en la ciudad, situación que agrava el problema de congestión ya existente.

### **2.1 El tiempo como indicador de congestión**

Los indicadores mencionados anteriormente permiten analizar el proceso mediante el cual diferentes factores han contribuido a la generación de situaciones de congestión para la ciudad de Medellín. Es claro que el tiempo de viaje ha aumentado, que hay tendencia creciente en el parque automotor y que la inversión en infraestructura de transporte no ha sido suficiente para superar la situación de congestión vehicular, por lo que es necesario pensar en mecanismos complementarios que permitan solucionar tal problema. Conviene, al respecto, comparar el caso de Medellín con los de otras ciudades del mundo que presentan problemas de congestión, a fin de mejorar nuestra comprensión del asunto. Para esto se tendrán en cuenta las 5 ciudades más congestionadas del mundo y las ciudades que son referentes internacionales en cuanto a corregir el problema de congestión. Es importante tener en cuenta que el caso de cada ciudad implica un contexto particular que hace su situación única, pero, aún así, un indicador adecuado de comparación es la diferencia entre el tiempo de desplazamiento promedio en una situación de congestión y una situación libre de congestión (Russo, 2015).

La información presentada a en la Tabla 3 hace parte del *TomTom Traffic Index* para el año 2015. Este indicador se basa en el tiempo de viaje durante todos los días del año, diferenciando entre el tiempo promedio de viaje cuando hay situaciones de congestión (hora pico) y el tiempo promedio de viaje en situaciones libres de congestión (hora valle).

**Tabla 3. Ranking de ciudades en cuanto a congestión vehicular**

<b>Ranking</b>	<b>Ciudad</b>	<b>Nivel de congestión (Tiempo extra %)</b>	<b>Malla vial km</b>
1	Ciudad de México	59	55.419
2	Bangkok	57	40.837
3	Lódź	54	3.271
4	Estambul	50	18.178
5	Rio de Janeiro	47	20.211
20	Londres	38	48.952
64	Singapur	31	8.518
84	Estocolmo	29	7.630
126	Chicago	26	46.735

Fuente: Elaboración propia a partir de *The TomTom Traffic Index*

Ciudad de México es la ciudad más congestionada del mundo: la diferencia entre el tiempo de viaje en una situación de congestión en comparación con una situación de no congestión es 59%; esta cifra indica el tiempo adicional que se tardan los individuos en desplazarse cuando la ciudad se encuentra congestionada. En segundo lugar se encuentra Bangkok: esta ciudad tiene un exceso de 57% en el tiempo de desplazamiento, seguido por Lódź, cuyo indicador de exceso es 54%. Los puestos 4 y 5 pertenecen a Estambul y Rio de Janeiro, con 50% y 47% de tiempo extra respectivamente. De otra parte, Londres, con 38% de tiempo extra, Singapur, con 31%, y Estocolmo, con 29%, ocupan las posiciones 20, 64 y 84. Estas ciudades tienen en común los peajes urbanos de congestión. Esto implica que los niveles de congestión podrían ser mucho más altos si no se contara con este mecanismo. Finalmente, en la posición 126 se encuentra Chicago, ciudad que tiene 26% de tiempo extra en sus desplazamientos, y, sin embargo, como se mostrará más adelante, se encuentra estudiando medidas que permitan mejorar la movilidad de la ciudad.

A pesar de que Medellín no figura en el informe presentado por *The TomTom Traffic Index 2015*, no significa que se encuentre en una situación favorable. Nosotros estimamos, con información suministrada por la Secretaría de Movilidad de Medellín para el año 2013<sup>1</sup>, que se requiere un 33% de tiempo adicional para desplazarse en horas congestionadas, ubicándose por encima de ciudades como Singapur, Estocolmo y Chicago, que aplican en la actualidad peajes por congestión<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> La información fue recolectada entre los meses de Octubre y Noviembre de 2013, y cada corredor vial fue observado durante 5 días aproximadamente. Para la situación de congestión se tiene en cuenta el periodo de tiempo entre las 5:00 pm y las 7:00 pm y la situación libre de congestión está comprendida entre las 11:00 am y las 2:00 pm. Se tomó el promedio de la distancia de los diferentes corredores viales que fueron estudiados y se encontró una distancia promedio de 2.798 kilómetros, para recorrer esta distancia en una situación de no congestión en promedio se requieren de 9 minutos y para una situación de congestión se necesitan en promedio 12 minutos.

<sup>2</sup> A pesar de que la metodología utilizada para medir el nivel de congestión para Medellín no es tan precisa como la presentada en el *TomTom Traffic Index*, permite confirmar la tendencia encontrada con los indicadores mencionados anteriormente, es decir, se confirma la presencia de congestión vehicular en Medellín. Es importante resaltar que uno de los indicadores más acertados y utilizados en la literatura de Economía de Transporte para medir la congestión hace alusión al tiempo de desplazamiento que tarda una persona para movilizarse de un lugar a otro (Zhao, an, y Wang, 2010; Yang, 1999; Hills y Evans, 1993; Prat, 2004). Por lo demás, la comparación de Medellín con ciudades del mundo en las

### 3. Marco teórico, revisión de literatura y recuento de algunas experiencias internacionales

#### 3.1 Marco teórico y revisión de literatura

El término congestión puede ser definido de diferentes maneras, según el énfasis que se quiera dar a alguno de sus aspectos, consecuencias o factores determinantes. Por ejemplo, según Tyler, Bohórquez, Suescún y Velásquez (2013: pp 7):

*La congestión desde un punto de vista teórico puede definirse como la relación entre la capacidad de una infraestructura de transporte y el número de vehículos que desean transitar por ella. En el momento en que el ingreso de un vehículo adicional en la vía estorba el desplazamiento de los demás, comienza la situación de congestión. La congestión se intensifica a medida que la cantidad de vehículos en la vía aumenta y esto lo experimentan los usuarios de las vías mediante mayores incrementos en su tiempo de viaje.*

En tanto que, según de Rus, Méndez y Merchán (2003: pp 13):

*La externalidad se produce porque cada usuario, al tomar su decisión de utilizar una carretera, sólo tiene en cuenta el coste que le supone el tiempo que va a emplear en el viaje, más el coste monetario de utilización del vehículo, pero no valora que al circular con su automóvil está haciendo que el tráfico sea menos fluido para todos los usuarios. Por tanto, el último usuario que entra en una carretera congestionada está imponiendo un coste en términos de tiempo extra al resto de automóviles en la carretera que ese usuario no paga.*

La principal variable en la medición de los costos de congestión radica en el costo de oportunidad del tiempo de los usuarios para sus desplazamientos, compuesto por dos elementos, el primero conocido como el costo individual, que puede definirse como lo que le cuesta a cada individuo el tiempo de movilizarse por la red de transporte (costo de oportunidad individual), y, el segundo, corresponde al costo social, que se refiere al costo para toda la sociedad que se genera a partir de la suma de los costos individuales y el que estos generan al resto de la sociedad por congestionar la red de transporte (Prat, 2004; Asensio y Matas, 2008). El costo de oportunidad individual de la congestión hace que el individuo esté dispuesto a asumir un costo de uso de su medio de transporte (el costo directo; sin referirnos ahora a su costo de oportunidad) mayor al que soportaría en ausencia de la solución al problema de congestión con el fin de desplazarse más rápido. Este incremento en el costo individual (directo) del uso de su medio de transporte asociado a la solución del problema de congestión se denomina el cargo por congestión.

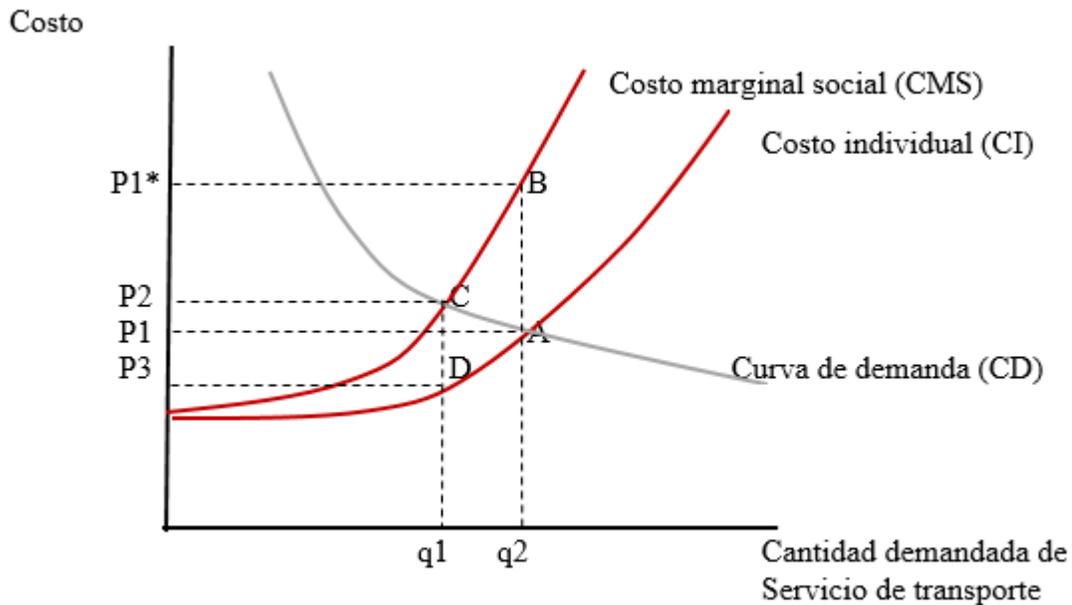
Esto puede observarse en el Gráfico 1, donde el punto A representa el costo individual directo (CI) con un costo P1. El punto B representa el costo marginal social (CMS), con un costo P1\*. El punto C hace alusión al caso en el cual los usuarios del sistema internalizan los costos por congestión, pagando un P2 que es mayor que el costo individual P1. La diferencia entre P2 y P3 corresponde al cargo por congestión para realizar una asignación óptima de los recursos, correspondiente al equilibrio entre el beneficio adicional que

---

cuales hay problemas de congestión vehicular se hace con el objetivo de justificar herramientas que permitan mitigar el problema detectado, pues lo ideal es proponer soluciones antes de que se lleve a niveles de congestión como los de Ciudad de México o Bangkok.

obtiene la sociedad por la utilización de infraestructura de transporte y el costo (social) adicional de su uso.

**Gráfico 1 Diagrama costo marginal social.**



Fuente: Tyler *et al.*, 2013.

A pesar de que en los últimos años ha sido más evidente el problema de la congestión vehicular, éste venía preocupando a economistas desde tiempo atrás. Pigou (1920), en su libro *Economics of Welfare*, fue quien abordó inicialmente este problema (que parecía, en ese entonces, propio del campo de la ingeniería) en términos económicos. Propuso abordar la congestión vehicular como un problema tal que los agentes no internalizaban el costo que le generaban a la sociedad al usar su vehículo. Para solucionar este problema era necesario que los usuarios internalizaran el costo social por medio de un impuesto. Basados en esta premisa se inició toda una línea de estudio en la cual se destacaron Vickrey (1969), con su trabajo *Congestion theory and transport investment*, Walters (1961), con *The theory and measurement of private and social costs of highway congestion*, y Downs (1962) con *The law of peak-hour expressway congestion*. A partir de estos estudios, conceptos como racionalidad y optimización empezaron a ser tenidos en cuenta para modelar el comportamiento de los usuarios, y se acentuó la motivación para construir funciones matemáticas para representar el comportamiento de los agentes, suponiendo que buscan maximizar una función de utilidad sujeta a restricciones presupuestales.

En el proceso de representar desde el punto de vista de la economía la situación a la que se enfrentan los agentes cuando han de soportar la congestión vial surgió el trabajo de Arnott, de Palma y Lindsey (1993) titulado *A Structural Model of Peak-Period Congestion: A Traffic Bottleneck with Elastic Demand* que buscaba corregir algunas falencias encontradas en Vickrey (1969) por medio de un modelo estructural que tiene en cuenta la tecnología y

el comportamiento al tomar decisiones por parte de los usuarios. Arnott *et al.* (1993) expusieron la manera cómo interactúan las decisiones de los usuarios y la valoración del tiempo en el problema de la congestión vehicular. Se parte de que los usuarios son racionales y, por lo tanto, buscan maximizar su utilidad, por lo cual desean pasar el menor tiempo posible en embotellamientos, pues esto les genera un costo representado en tiempo de viaje y dinero. Para minimizar este costo deben tomar la decisión entre salir o no en la hora pico; así, deben tener información acerca del estado de la vía y, de acuerdo con la valoración de su tiempo, decidirán si lo gastan en un embotellamiento o si retrasan su hora de salida logrando de esta manera reducir su tiempo de viaje.

Por otro lado, Deaton y Muellbauer (1980), en su modelo casi ideal de demanda, fundamentaron y desarrollaron un método práctico de obtención de la elasticidad precio de la demanda, la elasticidad precio cruzada de la demanda y la elasticidad gasto o ingreso. Esto es importante para esta investigación pues si es factible una sustitución entre los diferentes medios de transporte, los agentes escogerán la mejor alternativa para ellos (dadas sus restricciones presupuestales), dejando claro que el transporte público es un bien necesario, pero que, en la medida en que los agentes perciben mayores ingresos, crecerá la probabilidad de que utilicen el transporte privado, generando mayores niveles de congestión vehicular.

Por otra parte, los casos internacionales que se presentan a continuación demuestran que la inversión en infraestructura, en particular la construcción de nuevas vías, debe ser una medida complementaria de los mecanismos basados en precios, y en ningún momento debe considerarse como la única solución al problema de congestión vehicular.

Las aplicaciones de mecanismos basados en la teoría económica más reconocidas han tenido lugar en Londres y en Singapur, en donde la implementación de cobros por congestión logró dar solución a los problemas de movilidad sufridos en estos territorios. Sin embargo, como lo describe Litman (2011), no solo basta con imponer un precio sino que es necesario crear un entorno adecuado que garantice el éxito del mecanismo; esto incluye inversión en infraestructura, en transporte público, la creación de nuevas rutas, el incentivo a usar medios de transporte alternativos como las bicicletas y, sobre todo, el manejo transparente y adecuado de los recursos obtenidos del sistema.

### **3.2. Experiencias internacionales**

#### **Londres**

El esquema planteado para Londres ha llamado la atención en el mundo, pues tuvo lugar en una gran ciudad cuyo problema de congestión estaba influyendo negativamente en las dinámicas cotidianas de los ciudadanos. Londres era el escenario ideal para la implementación de un sistema de cobro por congestión puesto que sus vías estaban llegando al límite de capacidad, lo que generaba disminución en la velocidad de desplazamiento y aumentos significativos en los tiempos de viaje, en especial en la zona central. Más aún, a pesar de que los ciudadanos contaban con alternativas de desplazamiento (taxis, buses, *subway* y caminar) la opción de viajar en automóvil era la

más demandada entre los londinenses, razón por la cual el problema de congestión vehicular en el centro de la ciudad se había agudizado (Litman, 2011).

El proceso mediante el cual se logró implementar el cobro por congestión empezó en el año 2000 gracias a los poderes especiales concedidos al alcalde Kevin Livestonge; sin embargo, no fue sino hasta Febrero de 2003 cuando inició el funcionamiento del cobro. El sistema se implementó en un área de 22 kms cuadrados que forma un cordón, que es intensivo en cámaras de seguridad aprovechando la infraestructura ya existente en la ciudad. El valor que se debe pagar para entrar en esta área es de 8£ (Tabla 4).

El mecanismo implementado ha sido criticado pues no contempla una tarifa flexible coherente con los niveles de congestión que se presentan en cada hora. Con todo, el proyecto fue un éxito visto en los siguientes términos: la velocidad media de los automóviles en la zona de congestión durante los días en los que se cobra la tarifa incrementó 37%. Antes del peaje la velocidad promedio de los vehículos en la zona era de 13km/h; después de implementarse la tarifa la velocidad promedio de los vehículos en la zona se incrementó a 17km/h. Aproximadamente 110.000 automovilistas por día pagan la tarifa, de los cuales 98.000 son conductores individuales y 12.000 son viajeros con vehículo compartido. Cerca de un millón de personas entran al centro de Londres durante la hora pico en la mañana (7-10 am); más de 85% de estos viajes se hacen en transporte público. Los retrasos en la hora de congestión disminuyeron 30%; los retrasos de viajes en buses en la hora de congestión disminuyeron 50%; el número de pasajeros de los buses se incrementó 14%; el de los pasajeros en el *subway* aumentó 1%, y, finalmente, los costos directos de transporte soportados por las empresas se redujeron en un intervalo de 20% a 40% gracias a la reducción en las demoras ocasionadas por la congestión.

### **Singapur**

El cobro por congestión establecido en Singapur, conocido como *Electronic Road Pricing* (ERP), es uno de los principales referentes como ejemplo exitoso de políticas que buscan solucionar el problema de la congestión vehicular (Pozueta, 2008; Prat, 2004; Goh, 2002). El ERP es resultado de un proceso de diversas medidas que implementaron las autoridades de Singapur a partir de 1972 con la intención de mitigar el creciente problema de congestión en la zona más dinámica de la ciudad. Se inició con impuestos sobre la posesión de automóviles; posteriormente se implementó un sistema de licencias por áreas, y, finalmente, se instauró el ERP en 1998.

El sistema de cobro funciona en el centro o núcleo de la ciudad, donde se presentaban altas tasas de circulación de vehículos motorizados, territorio reducido, alta densidad de población y altos niveles de congestión. El sistema se implementó en un área de 7,2 kms cuadrados, funcionando de lunes a viernes de 7:30 a 18:30 y los sábados con un horario de 10:15 a 14:00. El peaje tiene un valor medio de 1,5 € por entrada y cambia de acuerdo con el lugar y la hora. Tienen exenciones para entrar a la zona de pago de peaje los vehículos de emergencia y los de transporte público. Uno de los aspectos más importantes que tiene en

cuenta el ERP es la fluctuación de las tarifas de cobro pues, como lo describe Pozueta (2008), estas son revisadas cada 3 meses, teniendo en cuenta las velocidades medias de los vehículos.

### **Estocolmo**

El sistema que fue implementado en esta ciudad entró en funcionamiento a partir de Agosto de 2007 afectando un área de 50 kms cuadrados; la medida, al igual que en los casos citados anteriormente, buscaba reducir la congestión vehicular, mejorar la movilidad y tener un impacto positivo sobre el medio ambiente. A pesar de que los objetivos que tiene el sistema de cobro en esta ciudad no son diferentes a los objetivos presentados en los casos de Londres y Singapur, la manera cómo se implementó el sistema es un diferenciador importante que caracteriza la filosofía bajo la cual funciona el cobro.

A pesar de que la medida fue instaurada en Agosto de 2007, esta había estado en etapa de prueba desde Enero de 2006 hasta Julio del mismo año; posteriormente se sometió su continuidad a votación por medio de un referéndum, cuyo resultado fue el sí a favor del cobro por congestión. Eliasson (2008) y Börjesson, Eliasson, Hugosson y Brundell-Freij (2012) enmarcan el éxito del mecanismo bajo múltiples aspectos. Por un lado señalan ganancias en tiempos de viaje y disminución en el flujo vehicular; sin embargo, el aspecto más interesante que se expone es la confianza de los ciudadanos hacia las autoridades encargadas de la administración y funcionamiento del sistema de cobro, pues el dinero recaudado fue invertido en mejoramiento del transporte público y mantenimiento de vías, logrando de esta manera la aceptación del sistema como un método adecuado para enfrentar la congestión vehicular (Eliasson y Jonsson, 2011; Börjesson, Eliasson y Hamilton, 2016).

**Tabla 4 Indicadores de sistemas de cobro de congestión**

CIUDAD O PAÍS	SISTEMA	TARIFA	REDUCCIÓN TRÁFICO	VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO
Londres	Peaje Zonal con diferentes formas de pago en su mayoría electrónicas (2003)	Es una tarifa plana. Inicialmente costaba £5, pero aumentó a £8 desde 2008	-El tráfico se reduce en 15%. -Los retrasos en la hora de congestión disminuyeron 30%.	La velocidad promedio pasa de 13km/h a 17km/h.
Singapur	Electronic Road Pricing (1998)	Es una tarifa variable de acuerdo a la hora y el vehículo, sin embargo el máximo es de 1,7€	EL tráfico se reduce entre 13% y 15%	Se tienen velocidades de referencia para variar las tarifas, y están entre 20Km/h y 30 Km/h
Estocolmo	Peaje por congestión introducido temporalmente en 2006; luego se estableció definitivamente después del referéndum en 2007	Es una tarifa variable; puede costar 2€, 1,5€ o 1€ de acuerdo a la hora del viaje; se debe pagar tanto al entrar como al salir	-El tráfico personal se ha reducido entre 20% y 24% - El tráfico comercial ha reducido en 15% -Las colas se han reducido en un 50%	La velocidad de referencia para hacer cambios en los precios de peajes es de 13Km/h.

*Fuente: Elaboración propia a partir de Pozuela (2008), Matas (2004) y Börjesson, Eliasson, Hugosson y Brundell-Freij (2012)*

### **Chicago**

Una de las alternativas más interesantes para enfrentar el problema de la congestión es la que está proponiendo Chicago en su plan integral llamado *GO TO 2040*. En primer lugar se parte de la premisa de que la movilidad es el motor de la economía regional, por lo cual es necesario invertir en el mantenimiento y la modernización del sistema de transporte, con la intención de garantizar un mejor nivel de calidad de vida para sus habitantes y proporcionar escenarios para que la economía sea dinámica y competitiva (Chicago Metropolitan Agency for Planning, 2012).

Al igual que en los otros casos expuestos anteriormente, las autoridades de Chicago han identificado problemas de congestión en algunas zonas o rutas de la ciudad, debido a un sostenido crecimiento del parque automotor, al intensivo uso del automóvil y al deterioro de la antigua infraestructura. La Agencia Metropolitana de Planeación de Chicago (CMAP por sus siglas en inglés) en su plan integral *GO TO 2014*, está proponiendo una serie de medidas con el objetivo de transformar su sistema regional de transporte en un sistema moderno para competir en la economía global. Este plan se concentra en cuatro grandes tópicos: inversión estratégica, carreteras, tránsito y fletes. Para efectos de esta investigación se destaca una de las propuestas utilizadas en el tópico de carreteras, a saber: la tarifa de congestión.

En Chicago se busca implementar tarifas de congestión, pero, a diferencia de lo realizado en Londres o Singapur, en esta ciudad no habrá una zona o cordón que esté bajo algún cobro. Sin embargo, si comparte la idea de incentivar el uso del carro compartido, el cambio de rutas y horarios de viaje. El sistema será sencillo: se busca implementar carriles rápidos, utilizando en algunos casos la infraestructura ya existente y construyendo vías en otros casos. El uso del carril rápido tendrá un costo, que será pagado por quien valore más su tiempo y tenga la necesidad de llegar con más prisa a algún lugar. De esta manera se verán beneficiados tanto los que usen la carretera tradicional como los que decidan pagar por el uso del carril rápido, pues en ambos casos hay ganancias en términos de tiempos de viaje.

#### **4. Metodología**

Siguiendo a Train (2003), un modelo de elección discreta es un modelo que describe las elecciones que hacen los agentes entre diferentes alternativas. En particular, para este trabajo, los agentes deben elegir entre utilizar tren urbano (Metro), automóvil privado, bus u otro medio de transporte para realizar sus viajes o desplazamientos hacia o desde su lugar de trabajo. Este tipo de modelo permite articular la teoría sobre impuestos pigouvianos con el problema de congestión vehicular para una cierta ciudad, pues es posible observar como un conjunto de covariables influye en la decisión que toman los agentes con respecto al modo de transporte que eligen para realizar sus desplazamientos. Adicionalmente se puede estudiar la manera como la modificación de alguna de las covariables, manteniendo las otras constantes, afecta la elección del medio de transporte por parte de los agentes.

Todo modelo de elección discreta tiene tres características comunes: la existencia de un conjunto de elección, las probabilidades de elección asociadas a las diferentes alternativas y una especificación del modelo.

El conjunto de elección es el conjunto que enmarca todas las alternativas posibles de las que se puede valer un agente en determinada situación. Para asegurar la existencia de este conjunto es necesario que se cumplan tres propiedades:

1. *Alternativas mutuamente excluyentes*: el agente elige solo una alternativa del conjunto de elección.
2. *El conjunto debe ser exhaustivo*: el agente debe elegir necesariamente una de las alternativas.
3. *Número de alternativas finito*.

Por otro lado, cuando se aborda la característica de probabilidades de elección se debe tener en cuenta que los modelos de elección discreta suponen racionalidad de los agentes y, por lo tanto, que estos buscan en todo momento maximizar su utilidad (sujeta a restricciones). Cada alternativa perteneciente al conjunto de elección genera cierto nivel de utilidad al agente; sin embargo es importante resaltar que dicha utilidad es conocida únicamente por quien toma la decisión. En este caso se va a denotar la utilidad del individuo  $i$  con respecto a la alternativa  $j$  como  $U_{ij}$ , la cual a su vez está compuesta de una parte que es observada

por el investigador,  $V_{ij}$ , y un factor desconocido que afecta los niveles de utilidad,  $\varepsilon_{ij}$ . Es decir que la utilidad del individuo  $i$  respecto a la alternativa  $j$  está definida por la ecuación [1]:

$$U_{ij} = V_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad [1]$$

De acuerdo con Train (2003: pp 20),

*El investigador no conoce  $\varepsilon_{ij}$ ,  $\forall j$ , por lo que trata estos términos como variables aleatorias. La densidad de probabilidad conjunta del vector aleatorio  $\varepsilon'_i = \{\varepsilon_{i1}, \dots, \varepsilon_{ij}\}$  se denota como  $f(\varepsilon_i)$ . Dada esta densidad el investigador puede hacer afirmaciones probabilísticas acerca de la elección del decisor.*

Teniendo en cuenta lo anterior se puede definir la probabilidad de que el individuo  $i$  elija la alternativa  $j$  como se muestra en la ecuación [2]:

$$\begin{aligned} P_{ij} &= \text{Prob}(U_{ij} > U_{il} \forall j \neq l) \\ &= \text{Prob}(V_{ij} + \varepsilon_{ij} > V_{il} + \varepsilon_{il} \forall j \neq l) \\ &= \text{Prob}(\varepsilon_{il} - \varepsilon_{ij} < V_{ij} - V_{il} \forall j \neq l) \end{aligned} \quad [2]$$

Usando la densidad de probabilidad  $f(\varepsilon_i)$ , la expresión anterior que indica la probabilidad de que la diferencia entre las variables aleatorias  $\varepsilon_{il}, \varepsilon_{ij}$  sea menor que la diferencia entre las variables observadas  $V_{ij}, V_{il}$  puede reescribirse como en la ecuación [3], en donde la función indicadora  $I$  toma el valor de 1 si se elige  $j$ :

$$\int_{\varepsilon} I(\varepsilon_{il} - \varepsilon_{ij} > V_{ij} - V_{il} \forall j \neq l) f(\varepsilon_i) d\varepsilon_i \quad [3]$$

Una vez definida la forma de la probabilidad de elección asociada a cada alternativa se debe especificar el modelo que se usará para estimar dicha probabilidad. Esta especificación dependerá de la distribución de la densidad de probabilidad de la parte no observada de la utilidad definida previamente. El modelo que se utiliza usualmente para abordar este tipo de problemas es el Logit (binomial o multinomial), pues este es el modelo de elección discreta más simple y más usado, ya que es consistente con el comportamiento del agente que toma decisiones orientado a la maximización de la utilidad (Train, 2003).

El modelo Logit (binomial o multinomial) tiene en cuenta la forma descrita anteriormente de la utilidad aleatoria, pues sugiere que las decisiones de un individuo respecto a una alternativa  $J$  están compuestas por un componente que es conocido y por un componente aleatorio. El supuesto principal en este tipo de modelos está relacionado con la distribución de cada  $\varepsilon_{ij}$ , pues se supone que cada uno de estos elementos se distribuye idéntica e independientemente como una densidad de probabilidad tipo valor extremo o Gumbel, ecuación [4].

$$f(\varepsilon_{nj}) = e^{-\varepsilon_{nj}} e^{-e^{-\varepsilon_{nj}}} \quad [4]$$

Es necesario tener en cuenta que la resta de dos variables con una distribución como la mencionada conduce a una distribución de forma logística (Train, 2003) y forma parte del método de derivación de las probabilidades de elección Logit propuesto por McFadden en 1974. Dado lo anterior, la probabilidad de que un individuo  $i$  elija la alternativa  $j$  está dada por la ecuación [5]:

$$P_{ij} = Prob(V_{ij} + \varepsilon_{ij} > V_{il} + \varepsilon_{il} \forall j \neq l)$$

$$= Prob(\varepsilon_{il} < \varepsilon_{ij} + V_{ij} - V_{il} \forall j \neq l) \quad [5]$$

Después de seguir el método de derivación de McFadden se llega a la expresión que representa la probabilidad de elección Logit. Esta se escribe inicialmente en términos de  $V_{ij}$ , pero, de acuerdo con Cameron & Trivedi (2005) para un modelo Logit Multinomial  $V_j = \mathbf{X}'\beta_j$ , esta nueva forma permite escribir la probabilidad de elección Logit en términos de variables observadas, como la ecuación [6]:

$$P(y = j|\mathbf{X}) = \frac{\exp(\mathbf{X}'\beta_j)}{1 + \sum_{l=1}^J \exp(\mathbf{X}'\beta_l)} \quad [6]$$

La expresión anterior permite explicar el modelo econométrico usado para esta investigación. Primero, la variable  $y$  está definida como la variable dependiente; es una variable categórica que toma valores  $\{1,2,3,\dots,9\}$ , cada uno de estos valores representa un modo de transporte {Caminando, bicicleta, moto, bus, transporte informal (vehículos privados que prestan el servicio de transporte público sin permiso de las autoridades), taxi, automóvil privado, Metro y SIT<sup>3</sup>}, respectivamente; cada modo de transporte puede ser elegido por los individuos para realizar el desplazamiento a su lugar de trabajo. Siguiendo con el análisis de la expresión anterior, la elección de un modo de transporte  $j$  está condicionada a un conjunto de covariables nombrado como  $\mathbf{X}$  en la expresión matemática. En el modelo este conjunto  $\mathbf{X}$  está compuesto por siete covariables que influyen en la decisión del modo de transporte por medio del cual el agente se desplaza hacia su trabajo. Estas covariables son: tiempo promedio de viaje, estrato socioeconómico, ingresos mensuales, salario mensual, gastos mensuales, gasto mensual en transporte y género.

## 5. Datos y estadística descriptiva

Los datos que se han utilizado para describir la situación de movilidad en la ciudad de Medellín provienen en su mayoría de las EOD 2005 y 2012; algunos datos han sido tomados directamente de los resultados que se publican en estas encuestas; otros han sido obtenidos de los reportes de Calidad de Vida elaborados por *Medellín Como Vamos*, y que, también, están basados en información proveniente de las EOD. Sin embargo, los datos por individuos de la EOD son de carácter confidencial y el acceso a ellos está restringido a un reducido grupo de personas, por lo cual no fue posible acceder a la versión más reciente de esta encuesta para la elaboración de esta investigación.

---

<sup>3</sup> SIT: bus que opera bajo el llamado *sistema integrado de transporte*, articulado al sistema de Metro.

Teniendo en cuenta esta coyuntura, se pensó en fuentes alternativas que contaran con información similar a la encontrada en la EOD y que permitan modelar las elecciones de transporte de los habitantes de Medellín. En este sentido, la encuesta utilizada para este trabajo es la Encuesta de Calidad de Vida (ECV) para Medellín del año 2012. Se eligió este año por coincidir con el de realización de la EOD más reciente.

La ECV se realiza anualmente desde el año 2004, su más reciente versión data del año 2014 y tiene como objetivo medir a través del tiempo las condiciones socioeconómicas de los habitantes de Medellín; esta encuesta arroja información estadística acerca de índices relacionados con población, vivienda, hogar, empleo, trabajo y medio de transporte utilizado para desplazarse a trabajar, entre otros.

Para los objetivos de este trabajo la ECV aporta información que permite caracterizar las condiciones socioeconómicas de los habitantes de Medellín, pues es posible obtener variables por individuo con información acerca de su edad, comuna a la que pertenece y estrato socioeconómico relacionado con esta, condición laboral, salario, ingresos mensuales y gastos mensuales.

En cuanto a factores económicos, la ECV posee más información que la EOD, lo que permite conocer de mejor manera el efecto que tienen las variables económicas sobre la decisión del medio de transporte a utilizar. En cuanto a factores de ubicación relacionados con la realización del viaje, la ECV no posee tanta precisión como la EOD, ya que esta última tiene discriminado el motivo, tiempo promedio, origen y el destino del viaje. Con la ECV solo es posible tener como motivo de viaje la opción “ir a trabajar”, pero, de acuerdo con la EOD, este motivo de viaje es el más común entre los habitantes de Medellín pues 43% de los viajes en la ciudad son realizados por esta razón (*Área Metropolitana del Valle de Aburrá Movilidad, 2012*). El origen del viaje puede ser conocido en la ECV, ya que se cuenta con la comuna en la que vive la persona y el estrato socioeconómico como variables asociadas a ubicación; además, es posible conocer el tiempo promedio del viaje realizado por la persona cuando se dirige a su empleo. Por último, la ECV permite conocer el medio de transporte utilizado por las personas para desplazamientos asociados a trabajo.

La muestra utilizada para esta investigación contiene 14.119 observaciones las cuales son estudiadas a la luz de un conjunto de covariables compuesto por ocho covariables; cuatro de estas son variables categóricas: estrato socioeconómico, género, medio de transporte y tiempo de viaje, mientras que las otras cuatro variables son continuas: salario, gasto en transporte mensual, ingresos mensuales y gastos mensuales.

Como se observa en la Tabla 5, se encontró que el ingreso y el gasto mensual promedio son 1'183.842 y 1'286.190 pesos (del año 2012), respectivamente, mientras que el salario mensual promedio es de 969.718 pesos colombianos y el gasto en transporte mensual promedio asciende a 126.851 pesos colombianos.

**Tabla 5. Datos para el modelo. Estadísticas descriptivas (Medellín)**

<b>Variable</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
Estrato	14119	2,85	1	1	6
Género	14119	1,41	0,4913534	1	2
Tiempo empleo	14119	1,95	0,9098545	1	5
Transporte	14003	4,54	1,98	1	9
Salario	9800	969718,5	995925,7	0	9500000
Gasto Mensual	13611	1286190	1158612	1500	9000000
Gasto en transporte	14020	126851	181266,6	0	4500000
ingreso mensual	14110	1183842	1050451	0	9520000

*Fuente: Elaboración propia con base en Encuesta de Calidad de Vida (Medellín), 2012*

Por otro lado, como se muestra en la Tabla 6, el estrato socioeconómico contiene seis categorías, de las cuales los estratos 1, 2 y 3 contienen cerca de 75% de las observaciones de la muestra, mientras que los estratos 4, 5 y 6 representan 25 %. En cuanto a la participación por género en la muestra se cuenta con 59% de hombres y 41% de mujeres. La variable tiempo de desplazamiento está compuesta por cinco categorías que representan el rango de tiempo medido en minutos que toma desplazarse al lugar de empleo; las categorías son: [0,20], [21,40], [41,60], [61,80] y [80,+]. El tiempo promedio de desplazamiento en Medellín está entre 21 minutos y 40 minutos. La última variable categórica es el modo de transporte, que se divide, a su vez, en nueve categorías; estas representan las diferentes opciones que tienen los habitantes para realizar su viaje al trabajo, a saber: caminata, bicicleta, moto, bus, transporte informal, taxi, vehículo particular, metro y rutas integradas del metro (SIT). La opción más utilizada para desplazarse al trabajo es bus, pues representa 50% de la elección de la muestra; el viaje en automóvil privado es la segunda opción más elegida, con 14%, seguida por la opción moto con 11% de participación; en cuarto lugar está la caminata con 8,7% y, por último, la opción metro con 7,5%. Estos cinco medios de transporte son los más usados para desplazarse al trabajo.

**Tabla 6. Área metropolitana de Medellín. Frecuencias de variables categóricas**

Variable	Frecuencia	Porcentaje	Variable	Frecuencia	Porcentaje
<b>Estrato</b>			<b>Modo de Transporte</b>		
1	1789	12,67	Caminando	1231	8,79
2	467	33,08	Bicicleta	85	0,61
3	4169	29,53	Moto	1559	11,13
4	1598	11,32	Bus	7083	50,58
5	1211	8,58	Informal	276	1,97
6	682	4,83	Taxi	313	2,24
Total	14119	100	Automóvil particular	204	14,57
<b>Tiempo de viaje</b>			Metro	1053	7,52
[0,20]	4846	34,32	SIT	363	2,59
[21,40]	619	43,84	Total	14,003	100
[41,60]	2294	16,25	<b>Sexo</b>		
[61,80]	504	3,57	Hombre	8368	59
[80,+]	285	2,02	Mujer	5751	41
Total	14119	100	Total	14119	100

*Fuente: Elaboración propia con base Encuesta de Calidad de Vida (Medellín), 2012*

## 6. Resultados

Esta sección presenta los resultados obtenidos de la estimación del modelo Logit multinomial. Para este fin se utilizó la alternativa “Transporte particular (automóvil privado)” como categoría base y a partir de esta se realizaron las comparaciones con los otros medios de transporte que pueden utilizar los individuos para desplazarse a su trabajo. Los resultados se muestran inicialmente en términos de logaritmos de probabilidades (*Odds*), y permiten hacer comparaciones entre la probabilidad de que se elija una cierta alternativa frente a las otras posibilidades de elección. Posteriormente se harán variaciones en la covariable gasto en transporte, manteniendo todas las otras covariables constantes, con el objetivo de encontrar los efectos marginales asociados a dicho gasto y, así, observar cómo cambia la probabilidad de elegir determinando medio de transporte a medida que va variando el gasto mensual en transporte.

Las Tablas 7 y 8 contienen los resultados de la estimación del Logit Multinomial. Es importante tener presente que la alternativa “transporte particular” (automóvil privado) no aparece en ninguna de las dos tablas debido a que esta es la alternativa base. Por otro lado, las covariables que son categóricas les faltará una opción; esta deberá ser interpretada como la opción de comparación para las alternativas restantes.

Analizando las tablas 7 y 8 es posible notar que en general el cambio de estrato, es decir, pasar del estrato 1 que es el nivel base, a alguno de los otros estratos (2, 3, 4,5 o 6) disminuirá la probabilidad (el “riesgo”) relativa de tomar alguno de los medios de transporte en comparación con el automóvil privado. Esto sugiere que la elección del medio de transporte va a estar influenciada por el estrato socioeconómico de los individuos: a medida que el estrato es mayor la opción de ir al trabajo en automóvil privado es más preferida comparativamente con los otros medios de transporte. De igual forma, el tiempo

promedio de ir al trabajo parece influenciar la elección del medio de transporte, pero, a diferencia del estrato socioeconómico, su influencia no se mantiene uniforme para todas las alternativas de transporte. Por ejemplo, cuando el tiempo de viaje pasa de estar en el intervalo [0,20] minutos al intervalo de [21,40] minutos y para el caso de la alternativa “caminando” el riesgo relativo de tomar esta opción en comparación con la de “transporte particular” disminuye -2.25 unidades, mientras que para la alternativa “bus” este mismo cambio representa un aumento de 0.47 unidades en el riesgo relativo de elegir este medio de transporte en relación con el medio de comparación.

**Tabla 7. Determinantes de la probabilidad relativa de utilizar un medio de transporte en Medellín. Estimación Logit Multinomial**

VARIABLES	Caminando	Bicicleta	Moto	Bus
<b>2.Estrato</b>	-1.313*** (0.384)	-0.786 (0.490)	-0.588* (0.342)	-0.872*** (0.330)
<b>3.Estrato</b>	-2.145*** (0.378)	-1.575*** (0.508)	-1.480*** (0.331)	-1.826*** (0.317)
<b>4.Estrato</b>	-3.460*** (0.434)	-1.954*** (0.657)	-2.692*** (0.347)	-2.700*** (0.323)
<b>5.Estrato</b>	-3.826*** (0.447)	-2.391*** (0.796)	-3.477*** (0.370)	-3.417*** (0.331)
<b>6.Estrato</b>	-2.796*** (0.532)	-28.51 (497,097)	-4.501*** (0.553)	-3.459*** (0.368)
<b>2.Tiempo_empleo</b>	-2.250*** (0.183)	-0.173 (0.289)	-0.250** (0.104)	0.469*** (0.0906)
<b>3.Tiempo_empleo</b>	-2.647*** (0.388)	-0.617 (0.480)	-0.687*** (0.169)	0.729*** (0.138)
<b>4.Tiempo_empleo</b>	-2.625** (1.053)	1.374** (0.557)	-0.773* (0.401)	1.355*** (0.305)
<b>5.Tiempo_empleo</b>	-25.62 (101,239)	-0.424 (1.079)	-1.457*** (0.497)	0.925*** (0.332)
<b>2.Sexo</b>	0.603*** (0.146)	-26.20 (81,632)	-1.047*** (0.110)	0.622*** (0.0839)
<b>Salario</b>	-9.62e-07*** (1.24e-07)	-1.33e-06*** (3.69e-07)	-4.63e-07*** (5.81e-08)	-5.68e-07*** (4.11e-08)
<b>Gasto mensual</b>	5.34e-08 (9.23e-08)	1.60e-07 (2.05e-07)	-9.43e-08 (6.70e-08)	-9.37e-08** (4.75e-08)
<b>Gasto transporte</b>	-0.00281 (0.129)	-1.06e-06 (1.59e-06)	-1.33e-06*** (4.18e-07)	2.82e-06*** (2.99e-07)
<b>Ingreso mensual</b>	-4.00e-07*** (1.20e-07)	-1.25e-06*** (4.18e-07)	-6.74e-08 (7.21e-08)	-3.90e-07*** (5.42e-08)

Errores estándar en paréntesis  
\*\*\* p<0.01, \*\* p<0.05, \* p<0.1

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a las variables continuas, la interpretación de los coeficientes que arroja el proceso de estimación se debe hacer de la siguiente manera: un aumento en una unidad de la variable continua está asociado con un incremento/disminución en el riesgo relativo de usar alguno de los medios de transporte en comparación con la opción de viajar en transporte particular (automóvil privado). De acuerdo con lo anterior un aumento en una unidad del salario genera una disminución en el riesgo relativo de elegir los diferentes medios de transporte en comparación con el automóvil. Este mismo comportamiento se puede evidenciar en el ingreso mensual, pues un incremento en una unidad está implicando una disminución en el riesgo relativo de elegir los diferentes medios de transporte en relación con el transporte particular. Para ambas variables hay una tendencia hacia la disminución del riesgo relativo cuando hay un aumento de una unidad, ya sea en el salario o en el ingreso mensual; esto sugiere que a mayor poder adquisitivo más preferido es el uso del automóvil privado.

**Tabla 8. Determinantes de la probabilidad relativa de utilizar un medio de transporte en Medellín (continuación) Estimación Logit Multinomial**

VARIABLES	Transporte informal	Taxi	Metro	SIT
<b>2.Estrato</b>	-0.854** (0.390)	-0.866* (0.476)	-0.756** (0.342)	-0.414 (0.382)
<b>3.Estrato</b>	-1.947*** (0.385)	-1.531*** (0.460)	-1.897*** (0.333)	-1.348*** (0.376)
<b>4.Estrato</b>	-3.166*** (0.449)	-2.251*** (0.485)	-2.821*** (0.362)	-2.651*** (0.443)
<b>5.Estrato</b>	-3.801*** (0.512)	-2.319*** (0.500)	-3.494*** (0.406)	-3.866*** (0.599)
<b>6.Estrato</b>	-2.698*** (0.547)	-3.504*** (0.695)	-3.331*** (0.536)	-2.031*** (0.558)
<b>2.Tiempo_empleo</b>	0.473** (0.198)	-0.826*** (0.181)	0.659*** (0.137)	0.613*** (0.199)
<b>3.Tiempo_empleo</b>	1.203*** (0.237)	-1.801*** (0.440)	1.625*** (0.173)	1.568*** (0.228)
<b>4.Tiempo_empleo</b>	1.344*** (0.459)	-0.492 (0.652)	2.334*** (0.333)	2.488*** (0.381)
<b>5.Tiempo_empleo</b>	-0.152 (0.790)	-0.772 (0.778)	1.065*** (0.409)	0.256 (0.679)
<b>2.Género</b>	0.405*** (0.157)	0.210 (0.171)	0.511*** (0.107)	0.252* (0.145)
<b>Salario</b>	-3.38e-07*** (8.86e-08)	-2.66e-07*** (8.03e-08)	-5.64e-07*** (7.73e-08)	-3.88e-07*** (9.45e-08)
<b>Gasto mensual</b>	2.51e-07*** (8.11e-08)	2.03e-07** (8.24e-08)	-1.88e-07** (8.81e-08)	-4.75e-08 (1.10e-07)
<b>Gasto transporte</b>	3.00e-06*** (4.67e-07)	2.73e-06*** (4.55e-07)	3.07e-06*** (3.73e-07)	3.57e-06*** (4.27e-07)
<b>Ingreso mensual</b>	-5.71e-07*** (1.31e-07)	-3.48e-07*** (1.17e-07)	-5.49e-07*** (1.02e-07)	-5.65e-07*** (1.41e-07)

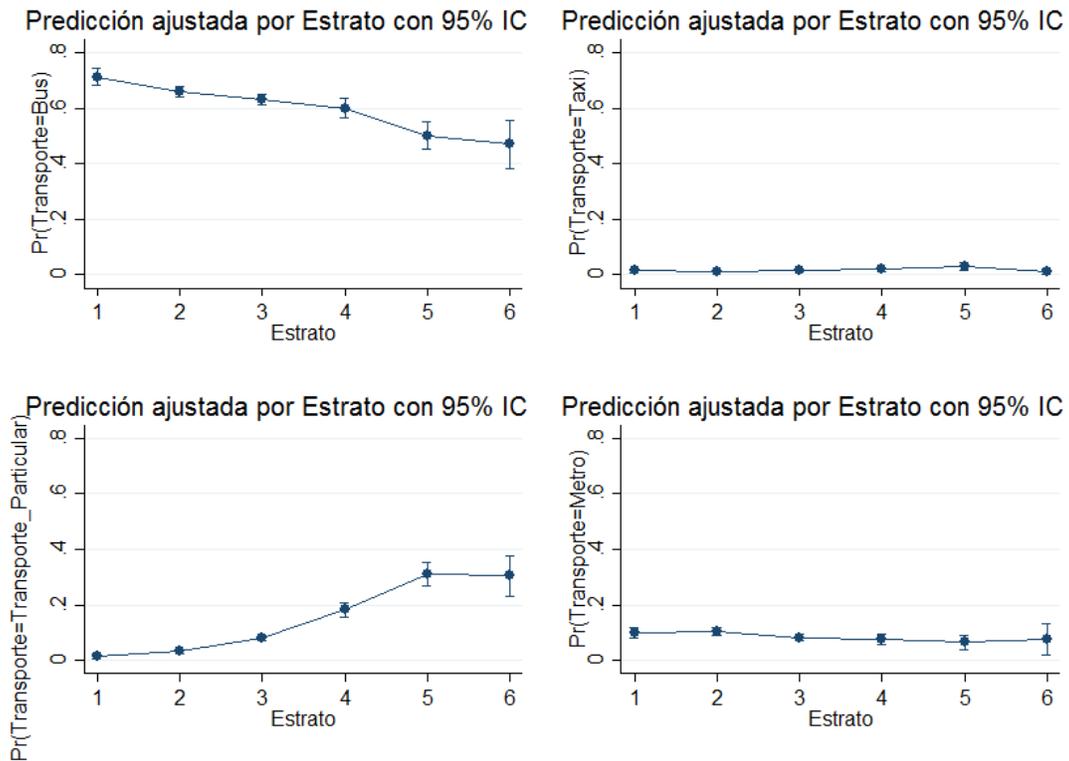
Errores estándar en paréntesis  
\*\*\* p<0.01, \*\* p<0.05, \* p<0.1

La covariable gasto en transporte tiene especial importancia para este estudio, pues es a partir de esta que se puede analizar el comportamiento de las decisiones de los agentes con respecto a determinadas medidas que pudiesen adoptar las autoridades que incidan en las restricciones presupuestales de los ciudadanos, como es la de un cobro por congestión al usuario del medio automóvil privado. En cuanto a los coeficientes que miden el riesgo relativo se encontró un comportamiento particular, pues un incremento en una unidad del gasto en transporte no tiene un impacto significativo en los coeficientes asociados al riesgo relativo de los medios de transporte caminata y bicicleta, mientras que para el caso de la alternativa viajar en moto arrojó un signo diferente al esperado, quizás porque la variable gasto en transporte, en el caso del usuario de la motocicleta, puede ser un factor de costo relativamente pequeño con respecto a otros costos como el de oportunidad para quien se desplace en transporte público. Para las alternativas de transporte restantes, el signo del coeficiente del riesgo relativo es el esperado, pues, dado un incremento unitario en el gasto en transporte, y manteniendo todas las otras covariables constantes, la probabilidad (el riesgo) relativa de permanecer en el medio de transporte bus, metro, taxi o SIT se incrementa en comparación con la alternativa de viajar en automóvil privado.

Una forma especialmente útil de analizar los resultados obtenidos es el examen de los efectos marginales, ya que por medio de estos se puede observar la manera como los cambios en una variable (manteniendo constantes las otras) modifican la probabilidad de elegir alguno de los medios de transporte. Teniendo en cuenta los resultados expuestos anteriormente, que estaban siendo interpretados como coeficientes de riesgo relativo, se decidió analizar detenidamente, por medio del enfoque de los efectos marginales, el impacto de las variables estrato socioeconómico y gasto en transporte en la elección del medio de transporte que se utiliza para desplazarse a trabajar y, en particular, la incidencia de los aumentos en el gasto en transporte en la decisión de seguir utilizando el transporte privado.

En el caso del estrato socioeconómico nos interesa conocer la relación que tiene éste con la probabilidad de elegir un medio de transporte. De acuerdo con el Gráfico 2 las probabilidades que se ven más afectadas por la pertenencia a un cierto estrato socioeconómico son las asociadas con la elección del automóvil privado o el bus como medio de transporte. En el caso de la alternativa viajar en bus, la probabilidad de ser esta la elegida por un individuo promedio en cada uno de los diferentes estratos es en general mayor que la probabilidad de elegir la alternativa viajar en automóvil privado. Por ejemplo, el estrato 1 tiene una probabilidad cercana a 71% de viajar en bus, mientras que tiene una probabilidad asociada a 1,4% de utilizar la alternativa viaje en automóvil privado. La probabilidad de viajar en bus para los estratos 2 y 3 es aproximadamente 63%, mientras que la probabilidad de viajar en automóvil privado es 3% y 7%, respectivamente. Los estratos 4, 5 y 6 son los que tienen la probabilidad más alta de viajar en automóvil; para el estrato 4 tiene un valor cercano a 20%, mientras que para los estratos 5 y 6 la probabilidad es aproximadamente 30%.

**Gráfico 2. Probabilidad de elegir un medio de transporte por estrato socioeconómico**



*Fuente: Elaboración propia*

Los resultados anteriores son coherentes con los analizados en las tablas 7 y 8, puesto que a medida que se avanza entre estratos socioeconómicos la probabilidad de que un individuo promedio viaje en automóvil va aumentando, mientras que la probabilidad de que este individuo promedio viaje en bus disminuye. En resumen, los resultados anteriores nos permiten conocer cómo se comporta un individuo promedio frente a la decisión de elegir un medio de transporte.

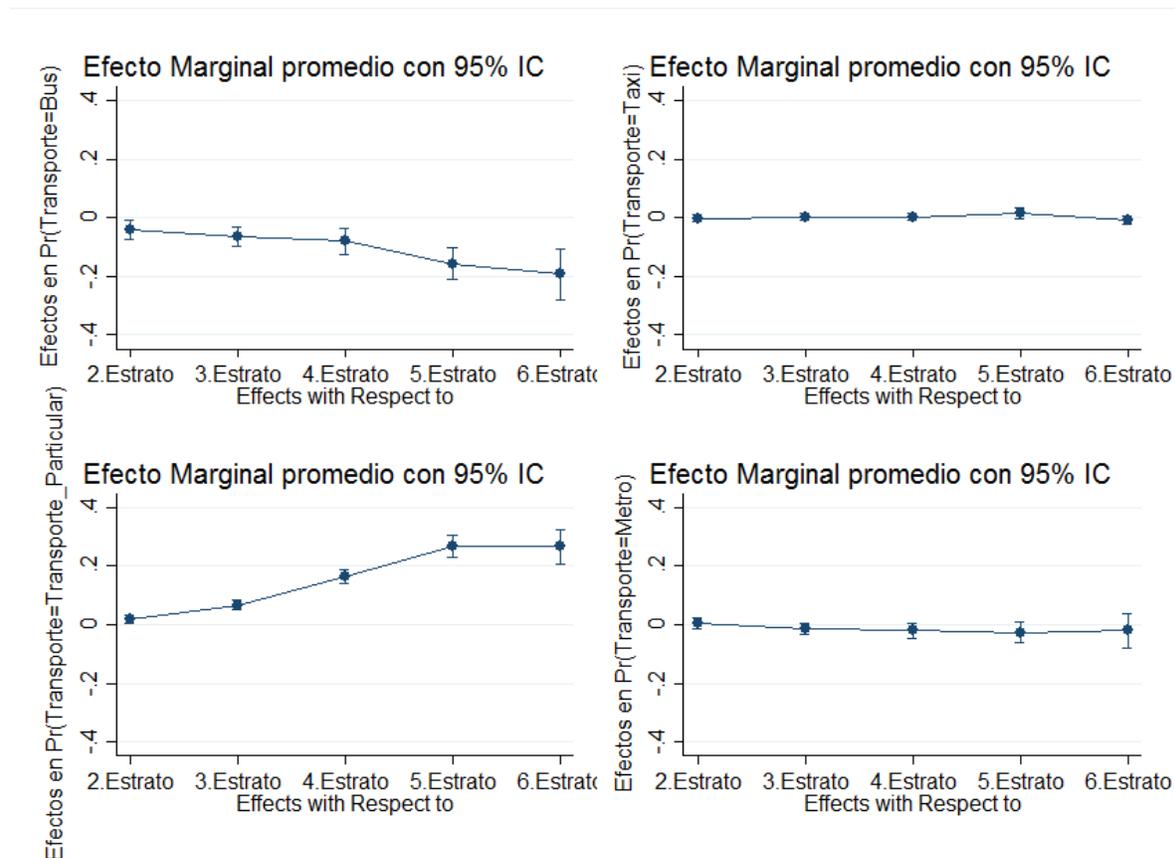
Adicionalmente, nos pareció interesante saber el efecto del cambio de estrato sobre la decisión de elegir un medio de transporte. Para tal fin se calculó la variación de la probabilidad de utilizar taxi, metro, bus o transporte particular al pasar del estrato 1 a cada uno de los estratos restantes. La diferencia entre los resultados que muestra el Gráfico 3 y los analizados anteriormente a partir del Gráfico 2 es que estos últimos muestran la probabilidad de que un individuo promedio de toda la muestra elija alguna de las alternativas, mientras que en el caso de los resultados presentados en el Gráfico 3 se parte de que cada estrato socioeconómico tiene un individuo promedio, el cual es comparado con el individuo promedio del estrato 1, que es el estrato base.

De acuerdo con el Gráfico 3, pasar del estrato 1 al 2 disminuye la probabilidad de viajar en bus 4% y aumenta la probabilidad de viajar en automóvil privado 2%; por otro lado, pasar del estrato 1 al 3 disminuye la probabilidad de viajar en bus 6% y aumenta la probabilidad de viajar en automóvil 7%; pasar del estrato 1 al 4 o al 5, representa un aumento en la

probabilidad de viajar en automóvil de 16% y 26%, respectivamente, mientras que estos mismos cambios disminuyen la probabilidad de usar el bus en 8% y 16% para cada uno de estos estratos. Finalmente, pasar del estrato 1 al 6 disminuye la probabilidad de usar bus 20% y aumenta la probabilidad de usar automóvil 26%.

En resumen, la incidencia del estrato socioeconómico es más fuerte para la decisión de viajar en automóvil privado que en transporte público. Para el transporte público, la curva de probabilidad tiene una forma más suave. Como era de esperarse, los estratos más altos tienen una probabilidad más baja de usar este tipo de transporte, pero la diferencia no es tan fuerte como la asociada al uso de automóvil privado. Esto implica que aún si los individuos pertenecen a diferentes estratos tienen una alta probabilidad de utilizar el transporte público como medio de transporte; en cambio, son muy grandes las diferencias en cuanto al uso del automóvil privado si los individuos pertenecen a estratos altos o bajos.

**Gráfico 3. Efectos marginales dependiendo del estrato socioeconómico**



Fuente: Elaboración propia

Ya se tiene conocimiento de las mayores y menores probabilidades de utilizar diferentes medios de transporte por individuos de diferentes estratos socioeconómicos; ahora nos interesa observar lo que puede ocurrir con la elección de las diferentes alternativas al variar el gasto en transporte. De acuerdo con la Tabla 9, un individuo promedio que utiliza automóvil privado para desplazarse a su empleo gasta mensualmente en transporte 142.000

pesos colombianos (de 2012). Si se implementase una medida tipo peaje por congestión este gasto se vería incrementado.

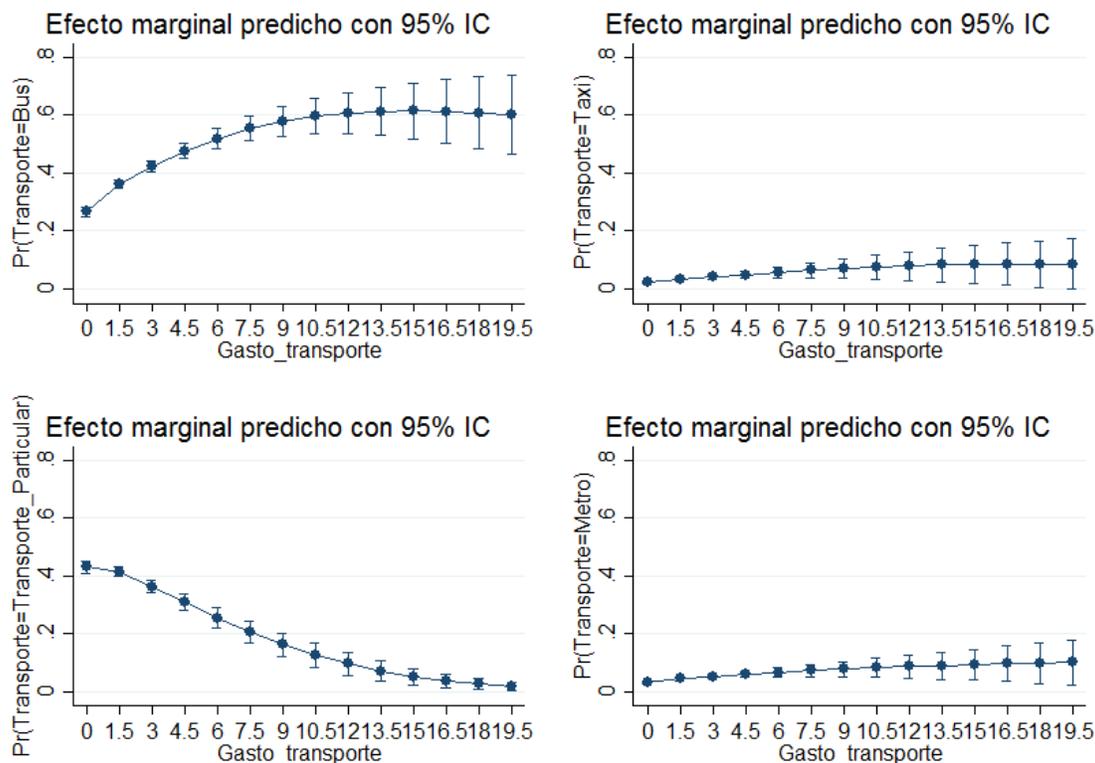
Dada la naturaleza de los datos no es posible conocer la disposición a pagar por parte de los individuos frente a diferentes tarifas de congestión, pero si podemos estimar la sensibilidad de las elecciones de alternativa de transporte de los individuos pertenecientes a un determinado estrato socioeconómico ante la variación de su gasto en transporte asociado, supuestamente, al establecimiento de una tarifa de congestión o peaje urbano.

Por ahora las estimaciones no están enfocadas a alguna zona específica de Medellín, pues simplemente se desea conocer la elasticidad de la opción por un cierto tipo de transporte al gasto individual en transporte. Una vez encontrada la evidencia de que este mecanismo basado en precios logra desincentivar el uso de transporte privado se podría buscar un refinamiento de estas estimaciones con factores espaciales y otras consideraciones que estén ajustadas a la normatividad existente.

El Gráfico 4 presenta las variaciones en la probabilidad de elegir una de las alternativas de desplazamiento cuando cambia el gasto en transporte. Es necesario anotar que esta variación se hace únicamente para aquellos individuos que viajan en automóvil privado a sus trabajos; por lo tanto el gráfico indica cómo se comporta la probabilidad de que los usuarios de automóvil sigan utilizando este medio de transporte, dados ciertos niveles de gasto, o por el contrario sustituyan el transporte particular por alguna de las opciones de transporte público.

De acuerdo con el Gráfico 4, a medida que el gasto en el medio de transporte automóvil se incrementa, la probabilidad de que los usuarios lo sigan utilizando va disminuyendo (dada su pertenencia a un cierto estrato socioeconómico). El bus es la opción que más probabilidad tiene de ser utilizada para sustituir el uso del automóvil, lo cual es coherente con los resultados que se han mostrado hasta ahora.

**Gráfico 4. Probabilidad de elegir un medio de transporte cuando varía el gasto en transporte**



Fuente: Elaboración propia

Por ejemplo, cuando el gasto mensual en el medio de transporte particular es 150.000 pesos (de 2012) la probabilidad de usar el automóvil privado es 41%; la probabilidad de usar bus es 36%, la de usar taxi es 3% y la de usar metro es 5%, mientras que cuando el gasto mensual asociado al transporte particular es de 300.000 pesos la probabilidad de usar el automóvil es de 36%, la probabilidad de usar bus es 42%, la de usar taxi es 4% y la de usar metro es 5%.

Para resumir lo anterior, se puede anotar que existe una relación entre el tipo de transporte utilizado para ir al trabajo y el estrato socioeconómico; adicionalmente se encontró que a medida que el gasto en transporte particular aumenta disminuye la probabilidad de usar este tipo de transporte, mientras que la probabilidad de usar bus aumenta; en el caso del metro y el taxi hay aumentos similares de probabilidad, pero no son tan grandes como en el caso de la opción bus. Sin embargo, es importante notar que para los individuos de estratos 1 y 2 la posibilidad de sustituir su medio de transporte ante un cambio del gasto es la menos probable: estos son los que tienen más probabilidad de tomar el bus y son los que menos reaccionan ante un posible cambio de estrato 1 a estrato 2 o 3. Por otro lado, los estratos 3,4, 5 y 6 podrían sustituir más fácilmente el automóvil privado por el transporte público, siendo los estratos 3 y 4 los que más probabilidad tienen de usar este último.

## 7. Conclusiones

El problema de congestión vehicular se ha ido incluyendo en la agenda de planeación de las principales ciudades del mundo, debido a que afecta el desempeño económico de algunos sectores y principalmente la calidad de vida. El objetivo de este artículo ha sido diagnosticar el nivel de congestión vehicular de la ciudad de Medellín y proponer alternativas basadas en teoría económica que permitan solucionar dicho problema. De acuerdo con la teoría económica, un mecanismo basado en precios, por ejemplo un peaje urbano, podría contribuir a disminuir los niveles de congestión, pues al pagar tal peaje los usuarios internalizan el costo de congestión que generan a la sociedad cuando deciden utilizar su automóvil privado. Este artículo, a diferencia de lo que ha sido usual en la literatura tradicional, propone estudiar la elasticidad de la demanda de uso de automóvil privado con respecto al gasto en transporte, en lugar de utilizar la metodología de preferencias declaradas. Nosotros nos basamos en el supuesto de que la variable gasto en transporte privado se vería afectada al imponer una tarifa de congestión (un peaje urbano); las variaciones de tal gasto modificarían las probabilidades de elección de los agentes entre transporte público y privado.

A partir de la información disponible se propusieron indicadores que permitieran analizar la situación de movilidad de Medellín. Se encontró que el parque automotor presenta tendencia creciente, que la infraestructura vial muestra signos de insuficiencia y que los tiempos de desplazamiento han aumentado. Por lo tanto, estos indicadores aportan evidencia para argumentar que Medellín tiene problemas de congestión vehicular.

Por otro lado, se comparó el tiempo de desplazamiento en Medellín en horas de congestión (pico) *versus* una situación de menor o ninguna congestión (horas valle), encontrando que cuando hay congestión un automovilista utiliza en promedio 33% de tiempo extra para recorrer la misma distancia que cuando no hay congestión. Chicago tiene 26% de tiempo extra en los desplazamientos en situaciones de congestión en comparación con situaciones de no congestión y está implementando un plan de movilidad que permita mejorar los tiempos de desplazamiento. Dicha medida está basada en un mecanismo de precios con el cual se busca internalizar el costo que genera el usuario al utilizar su automóvil privado, anticipando así su lucha contra los mayores costos futuros, económicos, ambientales y sociales, entre otros, derivados de la congestión. La decisión de pensar en alternativas basadas en el sistema de precios cuando el nivel de congestión no es aún demasiado grande surge de comparar los casos de Chicago con Ciudad de México, catalogada esta como la ciudad más congestionada del mundo, con 59% de tiempo extra en desplazamientos; esta cifra se pretende reducir por medio de mecanismos que incentiven el uso del transporte público.

Por medio de un modelo Logit Multinomial encontramos una relación, en el caso de Medellín, entre la probabilidad de usar automóvil privado y el estrato socioeconómico, el cual está asociado principalmente al nivel de ingresos. Los resultados indican que a medida que se aumenta de estrato socioeconómico la probabilidad de utilizar transporte privado se incrementa, mientras que la probabilidad de usar transporte público disminuye.

Por otra parte, se supuso que un hipotético peaje urbano afectaría el gasto en transporte, por lo que se decidió modificar la magnitud de esta variable y analizar cómo cambia la probabilidad de elección a partir de esa modificación. Los resultados encontrados son coherentes con lo que se deriva de la teoría económica, pues al aumentar el valor del peaje por congestión, representado en el aumento del gasto en transporte, la probabilidad de utilizar el automóvil privado disminuye y la probabilidad de usar el transporte público (bus) se incrementa.

Con todo, el establecimiento de peajes urbanos para el uso del automóvil privado debe ser complementado con el mejoramiento del sistema de transporte público, ya que este medio sería el que elegirían en gran medida los viajeros que dejarían de utilizar el automóvil privado. Cuando se propone mejorar el transporte público no nos referimos únicamente a inversiones grandes de capital sino también mejoras sencillas, como por ejemplo, tener información constante y acertada sobre las rutas y periodicidad de estas, es decir, mejorar el servicio por medio de una normativa adecuada y apropiada para las necesidades de sus habitantes.

El uso de las motocicletas hace parte del problema de congestión vehicular y no hace parte de las alternativas de transporte que podrían mejorar la movilidad en el área de estudio. En efecto, de acuerdo con la Secretaría de Tránsito y Movilidad de la ciudad de Medellín, en gran parte de los accidentes de tránsito hay motocicletas involucradas. Apoyados en Vickrey (1969), quien señaló que los accidentes de tránsito son una de las causas por las que se generan situaciones de congestión, es posible ver el canal por el que las motocicletas están contribuyendo al problema de congestión vehicular de Medellín.

La no significancia del uso de medios de transporte no motorizados (bicicleta y caminata) como sustituto del uso del automóvil privado debe servir como un llamado de atención a la deficiente infraestructura existente para este tipo de transportes en Medellín, a pesar de los avances que se han presentado en algunas comunas de la ciudad. Es importante incentivar el uso de la bicicleta y la caminata no sólo para contribuir a reducir la congestión vehicular sino también para el cuidado del medio ambiente. Finalmente, parece necesario pensar en la sustitución paulatina, en el margen, del parque automotor existente en buses que utilizan diésel por otros tipos de vehículos menos contaminantes como los que utilizan energía eléctrica.

## **8. Bibliografía**

*Área Metropolitana del Valle de Aburrá Movilidad. (2012). Encuesta origen y destino de hogares 2012, Disponible en: <http://www.metropol.gov.co/Movilidad/Pages/Inicio.aspx>. (n.d.).*

Arnott, R., Palma, A. De, & Lindsey, R. (1993). A Structural Model of Peak-Period Congestion: A Traffic Bottleneck with Elastic Demand. *The American Economic Review*, 83(1), 161–179.

Asensio, J., & Matas, A. (2008). Commuters' valuation of travel time variability. *Transportation Research Part E. Logistics and Transportation Review*, 44(6), 1074–

1085. doi:10.1016/j.tre.2007.12.002

- Börjesson, M., Eliasson, J., & Hamilton, C. (2016). Why experience changes attitudes to congestion pricing: The case of Gothenburg. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 85, 1–16. doi:10.1016/j.tra.2015.12.002
- Börjesson, M., Eliasson, J., Hugosson, M. B., & Brundell-Freij, K. (2012). The Stockholm congestion charges-5 years on. Effects, acceptability and lessons learnt. *Transport Policy*, 20, 1–12. doi:10.1016/j.tranpol.2011.11.001
- Cameron, A. C., & Trivedi, P. K. (2005). *Microeconometrics: methods and applications*. Cambridge university press. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Chicago Metropolitan Agency for Planning. (2012). *Congestion Pricing an analysis of the go to 2040 major capital projects*.
- de Rus Mendoza, G., Méndez, J. C., & Merchán, G. N. (2003). *Economía del transporte*. Antoni Bosch: Madrid.
- Deaton, A. & Muellbauer, J. (1980). An Almost Ideal Demand System. *The American Economic Review*, 70(3), 312–326.
- Downs, A. “. (1962). The law of peak-hour expressway congestion. *Traffic Quaterly*, 16, 393–409.
- Eliasson, J. (2008). Lessons from the Stockholm congestion charging trial. *Transport Policy*, 15(6), 395–404. doi:10.1016/j.tranpol.2008.12.004
- Eliasson, J., & Jonsson, L. (2011). The unexpected “yes”: Explanatory factors behind the positive attitudes to congestion charges in Stockholm. *Transport Policy*, 18(4), 636–647. doi:10.1016/j.tranpol.2011.03.006
- Goh, M. (2002). Congestion management and electronic road pricing in Singapore. *Journal of Transport Geography*, 10, 29–38. doi:10.1016/S0966-6923(01)00036-9
- Gonzales-Calderon, C. A. (2009). Estrategias tarifarias y desestimulación del pico y placa en medellín. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(14), 95–110.
- González-Calderón, C. A., Henao, J. J. P., & Sánchez-Díaz, I. D. (2012). The need for congestion pricing in medellin: an economic perspective. *DYNA*, 79(171) 123–131.
- Hills, P. & Evans, A. W. (1993). Road congestion pricing: when is it a good policy? A Comment, *Journal of Transport Economics and Policy*, 27(1), 91–105.
- Litman, T. (2011). *London Congestion Pricing Implications for Other Cities*. Victoria Transport Policy Institute. Retrieved from: <http://www.vtpi.org/london.pdf>
- Medellín Cómo Vamos. (2012). *Informe de Calidad de Vida de Medellín , 2012*.
- Medellín Cómo Vamos. (2014a). *Informe de Calidad de Vida de Medellín , 2014*.
- Medellín Cómo Vamos. (2014b). *Informe de percepción ciudadana: Movilidad y espacio público*.

- Medina, C. A., & Velez, C. E. (2011). Aglomeración económica y congestión vial: los perjuicios por racionamiento del tráfico vehicular. *Borradores de Economía*, 678, 1-51.
- Parry, I. W. H., Walls, M., & Harrington, W. (2011). Automobile externalities and policies. *Journal of Economic Literature*, 45(2), 373–399.
- Pigou, A. (1920). *The economic of welfare*. London: McMillan&Co.
- Pozueta, J. (2008). La Experiencia Internacional en Peajes Urbanos. *Cuaderno de Investigación Urbanística*, 01–32. Retrieved from [http://oa.upm.es/2846/2/INVE\\_MEM\\_2008\\_59442.pdf](http://oa.upm.es/2846/2/INVE_MEM_2008_59442.pdf)
- Prat, A. M. (2004). Políticas de transporte y congestión en áreas urbanas: un panorama. *Urban Public Economics Review*, 1, 63–91. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=50400103>
- Russo, A. (2015). Pricing of Transport Networks, Redistribution, and Optimal Taxation. *Journal of Public Economic Theory*, 17(5), 605–640. doi:10.1039/c3ce41464g
- Train, K. E. (2003). Discrete Choice Methods with Simulation. *Cambridge University Press*, 1–388. doi:10.1017/CBO9780511753930
- Tyler, N., Bohórquez, J. A., Suescún, J. P. B., & Velásquez, J. M. (2013). *Cobro de congestión en ciudades Colombianas*. University College London-Universidad de los Andes.
- Vickrey, W. (1969). Congestion theory and transport investment. *American Economic Review*, 59(2), 251-260.
- Walters, A. (1961). The theory and measurement of private and social costs of highway congestion. *Econometrica*, 19, 676–679.
- Yang, H. A. I. (1999). Evaluating the benefits of a combined route guidance and road pricing system in a traffic network with recurrent congestion, *Transportation*, 26, 299–322.
- Zhao, Z., an, S., & Wang, J. (2010). Development and Inspiration of Road Congestion Pricing Revenue Redistribution Theory Research. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 10(4), 93–100. doi:10.1016/S1570-6672(09)60058-1