



UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Tesis Doctoral

# **NUEVO MODELO DE PEAJE URBANO VINCULADO A UNA SEGREACIÓN DEL TRÁFICO POR NIVELES DE CALIDAD**

Doctorando:

**Juan Pedro Hormigo Ventura**

*Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos*

Director de la tesis:

**Dr. Mateu Turró i Calvet**

*Catedrático de Transporte de la UPC*

Tutor de la tesis:

**Dr. Sergi Saurí i Marchán**

*Profesor de Transporte de la UPC*

Programa de doctorado: Ingeniería Civil

E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona

Universidad Politécnica de Cataluña – UPC

Barcelona, abril de 2020

## **AGRADECIMIENTOS**

Mateu Turró, como director de tesis, por sus consejos, dedicación, paciencia y por estar siempre disponible cuando lo he necesitado.

A mi mujer Laura y a mis hijos, Joel y Alba, por su apoyo incondicional y por los grandes sacrificios que han asumido.

A la “Agencia d’Ecología Urbana de Barcelona” en especial a Xavi Ponts y Salvador Rueda por su ayuda y colaboración durante mi estancia allí.

A Sergi Saurí por su apoyo.

A Andreu Esquius de Mcrit por su disponibilidad y recomendaciones.

A Javier Ortigosa por sus aportes y consejos.

A Jonatan Calafi por su disponibilidad y entusiasmo.

## **RESUMEN**

Los peajes urbanos constituyen hoy en día uno de los instrumentos más esperanzadores para regular la entrada de vehículos en las ciudades, dada la flexibilidad y versatilidad que les otorga la tecnología disponible. Aunque pueden influir, inicialmente, un elevado grado de rechazo social han demostrado, en ciudades como Singapur, Londres o Estocolmo que intervienen con éxito en la reducción de la circulación de automóviles y permiten transferir a sus usuarios las externalidades que generan, consiguiendo reducir los problemas de congestión y deterioro ambiental de sus centros urbanos. En la primera parte de la tesis se hace un repaso de la experiencia internacional existente, focalizada en las principales ciudades donde se ha aplicado algún tipo de peaje urbano.

Las directivas europeas vigentes permiten, en cierta medida, aplicar tarifas reguladas, específicamente concebidas para reducir la congestión del tráfico y luchar contra sus externalidades medioambientales. De hecho, hay cada vez más ciudades que utilizan este instrumento para gestionar la demanda de movilidad. La aceptación pública para su implementación no es fácil, pero la experiencia demuestra que, a medio y largo plazo, se consigue gracias a las mejoras ambientales y de congestión generadas. En cualquier caso, es esencial para dicha aceptación que los ingresos generados por el peaje urbano se dediquen a la mejora del sistema de transporte público.

Los actuales esquemas tarifarios de peaje urbano suelen ser de tipo cordón o de área. En ambos esquemas los usuarios suelen pagar una tarifa fija por entrar en una determinada zona de la ciudad, sin que existan alternativas gratuitas. Estos esquemas no se ajustan al uso real que los vehículos hacen de la infraestructura urbana. En esta tesis se plantea un nuevo modelo urbano de peaje que, además de ayudar a reducir la congestión y contaminación en las ciudades, permita a sus usuarios disfrutar de un mejor servicio pagando una tarifa que se ajuste al uso real que hacen del viario urbano. Se demuestra que el nuevo modelo es socioeconómicamente eficiente y financieramente sostenible, de manera que permite emplear recursos adicionales a mejorar la movilidad de las ciudades.

La evolución tecnológica de los últimos años permite una implementación relativamente fácil del nuevo sistema de peaje urbano. El futuro es la total conexión del coche con su entorno, pero ya en la actualidad, el posicionamiento satelital unido al desarrollo de las comunicaciones C-V2X<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> C-V2X (Cellular-Vehicle-to-Everything): es un sistema de comunicaciones vehicular capaz de conectar a los vehículos entre sí y con su entorno. Esta tecnología acompañada del desarrollo de la red 5G permitirá una comunicación directa en tiempo real entre los equipos que estén conectados. De esta manera los vehículos tendrán la capacidad de enviar y recibir información de manera instantánea. La compañía de automóviles Ford anunció que en el año 2022 todos sus modelos estarán equipados con esta tecnología.

y el despliegue de las redes 5G abren posibilidades de identificación y de pago que hacen técnicamente viable su implantación.

En la última parte del documento, se hace una propuesta de aplicación del nuevo modelo de peaje urbano a la ciudad de Barcelona con el fin de analizar su impacto socioeconómico, ambiental y financiero. El documento se cierra con unas conclusiones globales y propuestas de investigación para el futuro.

Palabras clave: peaje urbano, tasa por congestión, análisis coste-beneficio, contaminación ambiental, tráfico, análisis socioeconómico, análisis financiero, modelos de transporte, tarificación viaria, impacto medioambiental, Barcelona, VAN, TIR.

## **ABSTRACT**

Urban tolls are nowadays one of the most promising instruments to regulate the entry of vehicles into cities, given the flexibility and versatility granted by the available technology. Although, initially, they represent a high degree of social disappointment, in cities such as Singapore, London or Stockholm, they have been shown to intervene successfully in the reduction of car traffic and transfer the externalities generated by vehicles to users, reducing the problems of congestion and environmental deterioration of its centres. Hence the interest of knowing the results of the existing international experience, so in the first part of this thesis we will review the main cities where they have been applied.

Current European directives allow, to some extent, to apply regulated tariffs, specifically designed to reduce traffic congestion and fight against its environmental externalities. That is why more and more cities use this instrument to manage the demand for mobility. Achieving public acceptance for its implementation is not easy, although experience shows that it is possible due to the environmental improvements and congestion reduction generated in the medium and long term. In any case, it is essential to integrate the income generated by the urban toll in the improvement of the public transport systems.

The current urban toll rate schemes are usually either of the cord or area type. In both schemes, users usually pay a flat rate for entering the city. In these schemes, the user does not have a free alternative and must pay a fee that does not fit the actual use of urban infrastructure. This thesis aims to propose a new urban toll model that, in addition to helping to reduce congestion and pollution in cities, allows its users to enjoy a better service of the urban road network and pay only for its actual use. We demonstrate that the suggested new model is socioeconomically and financially sustainable using the resources it generates in improving the mobility of cities.

The constant technological evolution allows a relatively easy implementation of the new urban toll system. The future is the total connection of the car with its surroundings. The toll for satellite positioning combined with the development of C-V2X<sup>2</sup> communications and the deployment of 5G networks opens the door to new urban charging schemes that allow the development of this new proposal urban toll.

---

<sup>2</sup> C-V2X (Cellular-Vehicle-to-Everything): is a vehicular communications system capable of connecting vehicles with each other and with their surroundings. This technology accompanied by the development of the 5G network will allow direct real-time communication between the connected devices. In this way, vehicles will have the ability to send and receive information instantly. The Ford car company announced that in 2022 all its models will be equipped with this technology.

In the last part of the document, we suggest how to implement the new urban toll proposed in the city of Barcelona, analysing its socioeconomic, environmental and financial impact. The document closes with some global conclusions and proposals for further research.

Key words: urban toll, congestion charge, cost-benefit analysis, environmental pollution, traffic, socioeconomic analysis, financial analysis, transport models, road pricing, environmental impact, Barcelona, NPV, IRR.

## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS .....	i
RESUMEN .....	ii
ABSTRACT .....	iv
ÍNDICE .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	xi
LISTA DE TABLAS .....	xvi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xx
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xxiii
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. OBJETIVOS .....	5
3. ESTADO DEL ARTE.....	7
3.1    Concepto y fundamento de los peajes urbanos.....	7
3.2    Origen de los peajes urbanos.....	9
3.3    Objetivos de los peajes urbanos .....	16
3.4    Ámbitos de aplicación de los peajes urbanos .....	18
3.5    Tarifas urbanas de peaje .....	18
3.6    Puntos de control en los peajes urbanos .....	21
3.7    Tecnología de cobro de los peajes.....	22
3.7.1    Peajes en flujo libre “free flow”.....	23
3.7.2    Problemática y obstáculos de cobro en los peajes “free flow” .....	24
3.7.3    Nuevas tecnologías de peaje electrónico.....	25
4. LAS EXPERIENCIAS INTERNACIONALES MÁS RELEVANTES EN PEAJE URBANO.....	27
4.1    Introducción.....	27
4.2    El caso de Singapur. Hacia el transporte sostenible .....	28
4.2.1    Políticas encaminadas a reducir la dependencia del vehículo privado .....	28
4.2.2    Políticas encaminadas a proporcionar modos de transporte alternativos .....	31
4.2.3    Políticas encaminadas a integrar los usos del suelo en la planificación del transporte .....	32
4.2.4    Direcciones claves de las políticas de transporte en Singapur .....	34
4.2.5    Tendencias en la movilidad de Singapur .....	36
4.2.6    Conclusiones .....	39
4.3    El caso de Londres. The London Congestion Charge .....	40

4.3.1	Antecedentes .....	40
4.3.2	Introducción.....	42
4.3.3	Los primeros años del “London Congestion Charge” .....	44
4.3.4	La política en el peaje urbano de Londres.....	47
4.3.1	La extensión oeste .....	48
4.3.2	La congestión en la zona central de Londres tras la extensión.....	50
4.3.3	La tasa por congestión y el medioambiente.....	51
4.3.4	Costes ingresos y beneficios del peaje urbano de Londres .....	54
4.3.5	Ganadores y perdedores .....	55
4.3.6	Conclusiones .....	57
4.4	El caso de Estocolmo. El éxito de su prueba piloto.....	58
4.4.1	Breve historia del proceso político .....	59
4.4.2	El diseño del sistema .....	59
4.4.3	Efectos del peaje urbano.....	64
4.4.4	Análisis coste beneficio .....	69
4.4.5	Reflexiones sobre el periodo de prueba del peaje urbano de Estocolmo .....	71
4.4.6	Conclusiones .....	75
4.5	El caso de Gotemburgo. Efecto, diseño y política.....	75
4.5.1	Introducción.....	75
4.5.2	Diseño.....	77
4.5.3	Efectos de la tasa por congestión sobre el volumen de tráfico .....	79
4.5.4	Efectos de la tasa por congestión en el tiempo de viaje .....	83
4.5.5	Cambio de hábitos de viaje e incremento en el uso del transporte público .....	84
4.5.6	Ingresos y costes del sistema.....	85
4.5.7	El proceso político y el referéndum del año 2014 .....	85
4.5.8	Conclusiones .....	88
4.6	Breves conclusiones sobre la experiencia internacional en peajes urbanos .....	89
<b>5.</b>	<b>MARCO TEÓRICO DE LA TARIFICACIÓN VIAL .....</b>	<b>91</b>
5.1	Introducción.....	91
5.2	Tarificación por uso: análisis básico .....	93
5.3	Aspectos a considerar en la tarificación vial .....	95
5.4	Tasa por congestión óptima en función de la distancia y del tiempo de viaje.....	97
5.5	El peaje como elemento de gestión eficiente de la movilidad.....	100
5.5.1	Maximización del bienestar social .....	101
5.5.2	Generación de ingresos.....	108

5.6	Tarificación vial, equidad y eficiencia .....	109
5.6.1	Impacto de la tarificación sobre la equidad .....	113
5.6.2	Integración de eficiencia económica y equidad en la tarificación .....	117
<b>6.</b>	<b>LA POSTURA DE LA UNIÓN EUROPEA SOBRE LA TARIFICACIÓN POR EL USO DE LAS INFRAESTRUCTURAS DE TRANSPORTE .....</b>	<b>123</b>
6.1	Introducción.....	123
6.2	La regulación de la tarificación vial de infraestructuras en la Unión Europea.....	124
6.2.1	Hacia la consolidación definitiva de la Euroviñeta .....	127
6.2.2	La Directiva 2004/52/CE sobre la interoperabilidad en los sistemas de telepeaje .....	129
6.3	Tendencias de la política de tarificación de infraestructuras en la Unión Europea.....	130
6.4	La Unión Europea y los peajes urbanos .....	131
<b>7.</b>	<b>LA CONGESTIÓN Y EL PEAJE URBANO COMO MEDIO PARA LA MEJORA DEL ENTORNO URBANO .....</b>	<b>133</b>
7.1	Introducción.....	133
7.2	El reto de la mejora de la calidad del aire.....	134
7.2.1	La normativa europea sobre calidad y evaluación del aire.....	135
7.2.2	La calidad del aire en Europa según la Agencia Europea del Medio Ambiente .....	137
7.2.3	Barcelona y sus problemas de calidad del aire .....	138
7.3	La necesidad de un sistema de peaje urbano como factor clave y decisivo para el desarrollo de la movilidad urbana sostenible .....	140
<b>8.</b>	<b>EL CONCEPTO DE “CONVIVIAL CITY” O CIUDAD SOCIABLE.....</b>	<b>142</b>
8.1	Marco de desarrollo del nuevo modelo de movilidad .....	142
8.2	Esquema de funcionamiento de la “Convivial City” .....	143
8.3	El modelo urbano de BCN Ecología. La “supermanzana”.....	145
8.3.1	Características del modelo de supermanzanas.....	150
8.3.2	El modelo de supermanzana y su aplicación en Barcelona .....	153
8.3.3	¿Es extrapolable el modelo de supermanzana de Gracia al resto de Barcelona? .....	156
<b>9.</b>	<b>UN NUEVO CONCEPTO DE PEAJE URBANO: UNA RED VIAL SEGREGADA Y TARIFICADA EN FUNCIÓN DEL NIVEL DE CALIDAD. 159</b>	
9.1	Razones para la aplicación de un peaje urbano .....	159
9.2	Funcionamiento del nuevo concepto de peaje urbano.....	161
<b>10.</b>	<b>SISTEMA TECNOLÓGICO DEL NUEVO MODELO DE PEAJE URBANO DENTRO DE LA “CIUDAD INTELIGENTE” .....</b>	<b>164</b>
10.1	Iniciativa europea de «Smart City» .....	164
10.2	El sistema de peaje con posicionamiento satelital. Una tecnología prometedora .....	166

10.2.1	Un ejemplo de aplicación. El peaje interurbano para camiones de Alemania.....	170
10.3	La conexión del vehículo con su entorno .....	171
10.3.1	Un ejemplo práctico. El proyecto “Road X” de Colorado .....	173
10.4	Propuesta de arquitectura del nuevo modelo de peaje urbano.....	175
10.4.1	La unidad embarcada “H-Mobility” .....	176
10.4.2	Subsistema de Seguimiento y Localización de Vehículos (SLV) .....	177
10.4.3	Subsistema de vigilancia ambiental (SVA).....	179
10.4.4	Subsistema de Control e Infracción (SCI).....	180
10.4.5	Subsistema de cobro (SC) .....	180
10.4.6	Integración de los diferentes subsistemas.....	181
10.5	La Ley de protección de datos de carácter personal .....	181
<b>11. METODOLOGÍA PARA ANALIZAR LA VIABILIDAD DEL NUEVO MODELO DE PEAJE URBANO .....</b>		<b>183</b>
11.1	Introducción.....	183
11.2	Modelización del escenario base .....	184
11.3	Principios teóricos para la modelización de la demanda.....	185
11.4	Estimación teórica del coste generalizado y recaudo bruto.....	192
11.5	Modelo de reparto modal en el continuo urbano de Barcelona.....	195
11.6	Análisis socioeconómico y financiero del proyecto .....	197
<b>12. APLICACIÓN A LA CIUDAD DE BARCELONA.....</b>		<b>199</b>
12.1	Introducción.....	199
12.2	Conclusiones sobre la movilidad en Barcelona y la necesidad de un peaje urbano .....	201
12.3	Diseño de la red de peaje urbano en Barcelona.....	202
12.4	Centro de control de tráfico.....	204
12.5	Política de incentivos y descuentos .....	205
12.6	Modelo de tráfico del nuevo sistema de peaje urbano en Barcelona.....	206
12.7	Escenarios y resultados del modelo de tráfico.....	211
12.8	Estimación del cambio modal tras la aplicación del peaje urbano .....	217
12.9	Conclusiones del estudio de tráfico .....	220
12.10	Análisis socioeconómico del proyecto .....	221
12.10.1	Antecedentes .....	222
12.10.2	Efectos sobre el sistema de transporte por la implantación de peaje urbano.....	225
12.10.3	Efectos sobre la salud de los ciudadanos.....	234
12.10.4	Costes del sistema de peaje urbano .....	236
12.10.5	Externalidades .....	239

12.10.6	Resultados del estudio socioeconómico para el primer año .....	241
12.10.7	Análisis de sensibilidad del estudio socioeconómico para el primer año.....	242
12.10.7.1	Conclusiones del análisis de sensibilidad para el primer año.....	248
12.10.8	Resultados del estudio socioeconómico para un periodo de 10 años .....	248
12.10.9	Análisis de sensibilidad para un ciclo del proyecto de 10 años.....	251
12.10.9.1	Conclusiones del análisis de sensibilidad para un ciclo de 10 años .....	253
12.11	Análisis financiero del proyecto.....	253
12.11.1	Ingresos y gastos para la administración .....	253
12.11.2	Análisis y resultados del estudio financiero .....	257
12.11.3	Conclusiones del estudio financiero.....	259
12.11.4	Análisis de riesgo del estudio financiero .....	259
12.11.5	Conclusiones del análisis de riesgo estudio financiero .....	262
<b>13.</b>	<b>CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>263</b>
13.1	Conclusiones .....	263
13.2	Líneas de investigación .....	265
<b>14.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>267</b>
<b>ANEJOS</b>	<b>.....</b>	<b>285</b>
ANEJO A.	Síntesis de las principales experiencias en peaje urbano .....	285
ANEJO B.	Características básicas de la movilidad en día laborable en Barcelona .....	314
ANEJO C.	Tabla de reparto modal en la red secundaria.....	338
ANEJO D.	Valores utilizados para los costes de operación.....	342
ANEJO E.	Cálculo de los costes de funcionamiento del vehículo privado.....	343
ANEJO F.	Cálculo de operación y mantenimiento de la nueva flota de transporte público .....	346
ANEJO E.	Datos básicos del sistema de bús y metro de Barcelona del año 2018.....	350

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de reconocimiento matrículas con OCR.....	24
Figura 2. Equipo de conteo (odómetro) del proyecto piloto de Oregón. Fuente: (Persad et al., 2007). .....	25
Figura 3. Ratio de tarifas a lo largo del día en los cuatro esquemas de precios. Fuente: (Diao, 2018). .....	29
Figura 4. Distribución de los pórticos de entrada al peaje urbano de Singapur. Fuente: (Diao, 2018). .....	29
Figura 5. Número disponible de (COE'S) y precio de la cuota para vehículos de categoría A. Fuente: (Diao, 2018). .....	30
Figura 6. Longitud en (km) del sistema ferroviario MRT/LRT. Fuente: Land Transport Authority. ....	32
Figura 7. Estructura espacial urbana de Singapur. Fuente: (Diao, 2018). .....	33
Figura 8. Estructura jerárquica de las nuevas ciudades. Fuente: (Diao, 2018). .....	33
Figura 9. Tarjeta inteligente de transporte público “EZ-link”. Fuente. <a href="http://www.ezlink.com">www.ezlink.com</a> .....	35
Figura 10. Desglose de ingresos operativos del Gobierno en el año 2016. Fuente: Gobierno de Singapur ( <a href="https://www.singaporebudget.gov.sg/budget_2017">https://www.singaporebudget.gov.sg/budget_2017</a> ).....	36
Figura 11. Ratio de motorización y media anual de vehículos por kilómetro (VKT). Fuente: LTA (Land Transport Authority).....	37
Figura 12. Número de viajeros en transporte público (en miles). Fuente: LTA (Land Transport Authority of Singapore). .....	38
Figura 13. Parque de vehículos en Singapur. Fuente: LTA (Land Transport Authority of Singapore). ....	39
Figura 14. Velocidad media en horas punta. Fuente: LTA (Land Transport Authority of Singapore). ....	39
Figura 15. Velocidad media del tráfico en el centro de Londres. Fuente: (Santos, G., Button, K., Noll, 2008). .....	41
Figura 16. Área “congestion charging” de Londres. Fuente: TfL (Transport for London). .....	42
Figura 17. “Congestion charge” de Londres. ....	43
Figura 18. Mapa del área de ampliación propuesta del LCCS. Fuente: TfL (Transport for London). ....	49
Figura 19. Congestión en la zona central del “congestion charging” de Londres. Fuente: TfL (Transport for London). .....	50
Figura 20. Área tarifada. La línea discontinua es el cordón de peaje. Los puntos rojos son los puntos de cobro y la línea continua es el “Essinge by pass” libre de peaje. Fuente: (Eliasson, Hultkrantz, Nerhagen, & Rosqvist, 2009). 60	
Figura 21. Incremento en el tiempo de viaje en cuatro importantes cuellos de botella de Estocolmo (comparación del modelo con la situación real). Fuente: (Eliasson, 2009). .....	61
Figura 22. Tele peaje con comunicaciones DSRC. Fuente: (Salas Rondón, 2008).....	63
Figura 23. Volumen de tráfico durante el periodo 1968-2006 en Estocolmo. Fuente: (Eliasson, 2009).....	65
Figura 24. Número de vehículos a través del cordón, 2005-2011. Las líneas discontinuas indican el periodo de tiempo entre el final de la prueba y la reintroducción. Los porcentajes en la parte inferior es la disminución del tráfico con relación a 2005. Fuente: (Eliasson et al., 2012). .....	66
Figura 25. Promedio de incrementos en los tiempos de viaje comparado con el flujo libre durante el periodo 2005- 2007. Fuente: (Eliasson, 2009).....	67
Figura 26. Diagrama de dispersión del índice de congestión y desviación estándar durante el periodo 2005-2007. Fuente: (Eliasson, 2009). .....	68
Figura 27. Cambios de viajes en vehículo privado a través del cordón tras el peaje. Fuente: (Eliasson, 2009).....	68

Figura 28. ¿Cree que fue buena o mala idea realizar un periodo de prueba de la tasa por congestión en Estocolmo? Fuente: (Winslott-Hiselius et al., 2009). .....	73
Figura 29. Porcentajes de opiniones negativas un año después del funcionamiento de los peajes urbanos de Bergen, Oslo y Trondheim. (Schade & Baum, 2007). .....	73
Figura 30. Cordón de peaje de Gotemburgo. Fuente: (Börjesson & Kristoffersson, 2015). .....	78
Figura 31. Número de vehículos a través del cordón durante los años 2012 y 2013. Fuente:(Börjesson & Kristoffersson, 2015). .....	80
Figura 32. Volumen de tráfico diario a través del cordón durante periodos de 15 min. Fuente: (Börjesson & Kristoffersson, 2015). .....	81
Figura 33. Cambios del volumen de tráfico en Gotemburgo en diferentes puntos de control. Fuente: (Börjesson & Kristoffersson, 2015). .....	81
Figura 34. Carreteras y enlaces donde se analizaron los tiempos de viaje antes y después de introducir la tasa por congestión. Fuente: (Börjesson & Kristoffersson, 2015). .....	83
Figura 35. Aumento relativo en el tiempo de viaje durante las horas pico de la mañana 7:00h-8:00h para diferentes categorías de carreteras. Fuente:(Börjesson & Kristoffersson, 2015). .....	84
Figura 36. Encuestados a favor de la tasa por congestión y el West Link en Gotemburgo. Fuente: (Börjesson & Kristoffersson, 2015). .....	88
Figura 37. Análisis Pigou-Knight (Rouwendal & Verhoef, 2006). .....	93
Figura 38. Ejemplo de estructura de red “Ochard Road”. Fuente: (Liu et al., 2014). .....	99
Figura 39. Óptimo peaje por distancia. Fuente: (Liu et al., 2014). .....	99
Figura 40. Tarifación basada en costes marginales bajo congestión. Fuente: (Salas Rondon, Miller Humberto; Robusté, F; Sauri, 2009). .....	102
Figura 41. Diagrama de flujos de un algoritmo genético. Fuente: (Fan, 2016). .....	108
Figura 42. Metodología propuesta en Leck, Bekhor y Gat (2007). Fuente: (Ortega, 2014). .....	110
Figura 43. Estrategia de tarifación de vehículos pesados y ligeros en la Unión Europea. Fuente: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat, 2016. ....	127
Figura 44. A la izq. concentración de PM <sub>2,5</sub> y a la derecha de PM <sub>10</sub> para el año 2017 en Europa (valor límite anual). Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente. ....	138
Figura 45. Concentración de NO <sub>2</sub> para el año 2017 en Europa (valor límite anual). Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente. ....	138
Figura 46. Plan Macià (1935). Plan regulador de conjunto de la nueva ciudad. Estado definitivo. Trazado en la totalidad con un nuevo módulo de 400x400. Fuente: (Salvador Tarragó Cid, 1980). .....	145
Figura 47. Situación actual (a la izq.) y nueva propuesta (a la derecha) de célula urbana para Barcelona. Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona. ....	146
Figura 48. Sistema actual (a la izq.) y nueva supermanzana (a la derecha). Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona. ....	147
Figura 49. Eficiencia red tráfico vs tamaño de isla para vehículo motorizado. Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona. ....	147
Figura 50. Tamaño óptimo de manzana. Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona. ....	148
Figura 51. Eficiencia global del sistema. Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona. ....	148
Figura 52. Escenario supermanzanas en Gracia. Fuente. (Magrinyà, 2003). .....	149

Figura 53. Ámbitos de aplicación de supermanzanas piloto en Barcelona. Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona. ....	150
Figura 54. Relación de tiempo-distancia para los diferentes modos de transporte. Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona. ....	152
Figura 55. Jerarquía viaria en el modelo de supermanzana. Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona. ...	153
Figura 56. A la izq. red viaria actual de Barcelona a la derecha escenario futuro con supermanzanas. Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona. ....	154
Figura 57. Supermanzanas en el Barrio de Gracia de Barcelona. Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona. ....	155
Figura 58. Prueba piloto de supermanzana en el barrio de Poblenou de Barcelona. Fuente: Ajuntament de Barcelona. ....	155
Figura 59. Objetivo final de implantación de supermanzanas en el barrio de Poblenou. Fuente: Ajuntament de Barcelona. ....	156
Figura 60. Trama urbana del Barrio de Gracia (izquierda). Trama urbana del Barrio Poblenou (derecha). ....	158
Figura 61. Desglose de los costes sociales (sin impuestos) del vehículo privado. Fuente: (Robusté, 2000). ....	160
Figura 62. Jerarquía vial del nuevo modelo de peaje urbano. El color azul la red básica de pago. En color verde la red secundaria gratuita. Fuente: Elaboración propia. ....	162
Figura 63. Concepto japonés de una ciudad inteligente. Fuente: Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón. ....	165
Figura 64. Ahorros de una movilidad inteligente. Fuente: (Viechnicki et al, 2015). ....	166
Figura 65. Ejemplo de transpondedor instalado en vehículo para realizar pago electrónico de peajes. ....	167
Figura 66. Cortina laser para clasificación vehicular. Fuente: (Persad et al., 2007) ....	170
Figura 67. Conexión inteligente del automóvil con su entorno a través de comunicaciones. ....	172
Figura 68. Esquema general del nuevo sistema de peaje urbano. Fuente: Elaboración propia. ....	176
Figura 69. Servicio y diagrama de procesamiento del dispositivo OBU. Fuente: Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. ....	176
Figura 70. Ejemplo de equipo de abordaje e integración en vehículo y “smartphone”. Fuente: TomTom Telematic. ....	177
Figura 71. Representación de los distintos costes en función de la alternativa de viaje. ....	178
Figura 72. Ejemplo de aviso de vehículo 007 rebasando un área restringida. Fuente: TomTom Telematic. ....	178
Figura 73. Ejemplo de reporte con la distancia recorrida por el usuario. Fuente: TomTom Telematic. ....	179
Figura 74. Ejemplo de dispositivo H-ECO Movilidad. ....	179
Figura 75. Ejemplo de arquitectura del subsistema (SCI). Fuente: Elaboración propia. ....	180
Figura 76 Representación del proceso para el pago de la tasa de peaje. ....	181
Figura 77 Integración de subsistemas en plataforma “Smart Mobility” ....	181
Figura 78. Modelo clásico de transporte de cuatro etapas. Fuente: www.uc.cl. ....	187
Figura 79. Esquema de funcionamiento de equipos Wifi/Bluetooth para cálculo de tiempos de recorrido. ....	193
Figura 80. Cuotas modales observadas y modeladas en los diferentes distritos de Barcelona. Fuente: (Mcrit, 2008). ....	196
Figura 81. Red básica de peaje urbano en Barcelona simulada con Transcad. ....	200

Figura 82. Propuesta de red básica para el peaje urbano en Barcelona.....	203
Figura 83. Red viaria rápida de peaje. Fuente: Elaboración propia.....	204
Figura 84. Red viaria lenta gratuita. Fuente: Elaboración propia.....	204
Figura 85. Esquema de funcionamiento del software de visualización. Fuente: ACISA.....	204
Figura 86. Centroides y conectores del modelo de tráfico de Barcelona en Transcad.....	207
Figura 87. Esquema de viajes dentro del área modelizada para el escenario base. Fuente: elaboración propia.....	208
Figura 88. Detalle de la red de vías básicas del peaje urbano en Barcelona.....	209
Figura 89. Distribución de viajes en el área de intra-rondas antes y después del peaje. Fuente: elaboración propia	210
Figura 90. Situación final de viajes tras la aplicación del peaje urbano. Fuente: elaboración propia.....	211
Figura 91. Gráfico con la situación base de la ciudad de Barcelona simulado con Transcad v.6.....	212
Figura 92. Diagrama de las pérdidas de tráfico tras la aplicación del peaje de 9 cts/km en la ciudad de Barcelona. En verde las calles que pierden tráfico.....	213
Figura 93. Diagrama de las ganancias de tráfico tras la aplicación del peaje de 9 cts/km en la ciudad de Barcelona. En rojo las calles que pierden tráfico.....	214
Figura 94. Diagrama de tráfico después de la aplicación del peaje 9 cts/km en la ciudad de Barcelona.....	214
Figura 95. Diagrama de tráfico después de la aplicación del peaje 16 cts/km en la ciudad de Barcelona.....	216
Figura 96. Encuestas sobre las alternativas que se plantean los usuarios de vehículos sin etiqueta ambiental que se mueven dentro de Barcelona tras la implementación de la Zona de Bajas Emisiones.....	219
Figura 97. Encuestas sobre las alternativas que se plantean los usuarios de vehículos sin etiqueta ambiental que se mueven entre Barcelona y el Área Metropolitana tras la implementación de la Zona de Bajas Emisiones.....	219
Figura 98. Variación de la demanda en millones de veh-km en red básica y secundaria en función de la tarifa.....	220
Figura 99. Variación de la velocidad en la red básica y secundaria en función de la tarifa.....	221
Figura 100. Calculadora de emisiones de contaminantes atmosféricos. Fuente: Departament de Territori i Sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya.....	236
Figura 101. Función de distribución de probabilidad Pert para el valor del tiempo: a) de los conductores que usan el peaje, b) de los conductores que no usan el peaje.....	245
Figura 102. Función de distribución de probabilidad Pert del número de viajes que pasan al transporte público para los distintos escenarios tarifarios.....	245
Figura 103. Función de distribución de probabilidad Pert utilizada para la inversión.....	246
Figura 104. Resultados estadísticos para el escenario tarifario de 9 cts/km.....	246
Figura 105. Resultados estadísticos para el escenario tarifario de 16 cts/km.....	247
Figura 106. Resultados estadísticos para el escenario tarifario de 30 cts/km.....	247
Figura 107. Evolución de la rentabilidad socioeconómica en función de la tarifa para un periodo de 10 años. Fuente: Elaboración propia.....	250
Figura 108. Histograma y función de distribución acumulada del VAN y TIR para una tarifa de peaje de 9 cts/km.....	251
Figura 109. Histograma y función de distribución acumulada del VAN y TIR para una tarifa de peaje de 16 cts/km.....	252
Figura 110. Histograma y función de distribución acumulada del VAN y TIR para una tarifa de peaje de 30 cts/km.....	252

Figura 111. Volumen de combustible ahorrado al año por el peaje urbano .....	254
Figura 112. Composición del precio del litro de combustible en España. Fuente: Análisis para una justa aplicación de la Directiva Euroviñeta. José Manuel Vasallo et al. ....	255
Figura 113 Flujo de caja del proyecto de peaje urbano de Barcelona tarifa 9 cts/km a 10 años. Fuente: elaboración propia. ....	257
Figura 114. Flujo de caja del proyecto de peaje urbano de Barcelona tarifa 16 cts/km a 10 años. Fuente: elaboración propia. ....	258
Figura 115. Flujo de caja del proyecto de peaje urbano de Barcelona tarifa 30 cts/km a 10 años. Fuente: elaboración propia. ....	259
Figura 116. Función de distribución de probabilidad Pert utilizada para la demanda de tráfico en un escenario tarifario de 16 cts/km. ....	261
Figura 117. Función de distribución de probabilidad Pert utilizada para las exenciones en un escenario tarifario de 16 cts/km. ....	261
Figura 118. Función de distribución de probabilidad Pert utilizada para el porcentaje impagos en un escenario tarifario de 16 cts/km. ....	261
Figura 119. Histograma y función de distribución acumulada del VAN y TIR financiero a 10 años para una tarifa de peaje de 16 cts/km. ....	262

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Instrumento de tarificación y sus objetivos. Fuente: CDR, 2009.....	9
Tabla 2. Tarifas de los peajes urbanos. Fuente: Elaboración propia.....	20
Tabla 3. Política de exenciones, descuentos y sanciones en los diferentes peajes urbanos. Fuente. Elaboración propia.....	21
Tabla 4. Superficie del ámbito del peaje y puntos de control de accesos. Fuente: (Pozueta Echavarri, 2008). .....	22
Tabla 5. Desglose de costes en la adquisición de un vehículo en Singapur en junio de 2014. Fuente: (Diao, 2018). 31	
Tabla 6. Excepciones y descuentos del peaje urbano de Londres. Fuente: Santos, G (2006). .....	43
Tabla 7. Variación de vehículos-kilómetros de la zona central de peaje entre 2002 y 2006. Fuente: (Santos, G., Button, K., Noll, 2008). .....	44
Tabla 8. Pasajeros y autobuses que cruzan la zona de peaje urbano. Fuente: <i>Transport for London</i> , 2005b.....	45
Tabla 9. Comparativa de la congestión 2002-2008 en la zona central del peaje en Londres. Fuente: Transport for London.....	51
Tabla 10. Esquemas tarifarios vehiculares aplicados en Londres. Fuente: <a href="http://urbanaccessregulations.eu/">http://urbanaccessregulations.eu/</a> . .....	53
Tabla 11. Costes y beneficios anuales del proyecto LCCS (London Congestion Charging Scheme). Fuente: (Santos, G., Button, K., Noll, 2008).....	54
Tabla 12. Uso de los ingresos netos del proyecto LCCS (London Congestion Charging Scheme). Fuente: (Santos, G., Button, K., Noll, 2008).....	54
Tabla 13. Tarifas en los diferentes tramos horarios (solamente días laborales). Fuente: (Eliasson et al., 2009). .....	60
Tabla 14. Reducción de tráfico a través del cordón comparado con el año 2005. Fuente: (Eliasson et al., 2012).....	66
Tabla 15. Coste-beneficio del sistema, en MSEK por año. Fuente: (Eliasson, 2009).....	70
Tabla 16. Reducción del volumen de tráfico a través del cordón durante diferentes periodos del día. Fuente: (Börjesson & Kristoffersson, 2015). .....	80
Tabla 17. Variación del tráfico en calles del centro de la ciudad. Fuente: (Börjesson & Kristoffersson, 2015).....	82
Tabla 18. Cambios en el volumen de tráfico en ciertas carreteras colindantes al cordón. Fuente: (Börjesson & Kristoffersson, 2015). .....	82
Tabla 19. Viajes por modo de transporte y tipo de viaje en los años 2012 y 2013. Fuente:(Börjesson & Kristoffersson, 2015) .....	84
Tabla 20. Valores óptimos peajes por distancia. Fuente: (Liu et al., 2014). .....	99
Tabla 21. Estructura cromosómica de un algoritmo genético. Fuente: (Fan, 2016).....	107
Tabla 22. Evaluación de la equidad propuesta por Litman (2005). Fuente: Ortega, (2014). .....	113
Tabla 23. Incidencia sobre la equidad del road pricing. Fuente: Ortega, (2014).....	118
Tabla 24. Ganadores y perdedores del road pricing. Fuente: Ortega, (2014).....	119
Tabla 25 Efecto de los contaminantes atmosféricos sobre la salud. Fuente: (Bull, 2003) .....	134
Tabla 26. Compromisos nacionales de reducción de dióxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y de compuestos volátiles no metálicos. Fuente: Diario Oficial de la Unión Europea de 17 de diciembre de 2016. ....	136
Tabla 27. Porcentaje de población urbana en la EU-28 expuesta a concentraciones de contaminantes atmosféricos por encima de las concentraciones de referencia de la EU y la OMS (mínimo y máximo observado entre 2015 y 2017). Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente. ....	137

Tabla 28. Nivel de cumplimiento en 2018 de los valores de referencia de la EU y OMS de las concentraciones medias agregadas en las estaciones de medida (tráfico interno o fondo) en Barcelona. Fuente: Agencia de Salud Pública de Cataluña.....	139
Tabla 29. Nivel de exposición potencial de la población a la media anual de PM <sub>10</sub> y NO <sub>2</sub> durante el 2018. Fuente: Agencia de Salud Pública de Cataluña.....	140
Tabla 30. Fases del programa “Road X” de Colorado. Fuente: CDOT.....	173
Tabla 31. Calendario de trabajo y recursos económicos necesarios del programa “Road X”. Fuente: CDOT. ....	173
Tabla 32. Equipo de comunicaciones con tecnología V2X instalado en carretera. Fuente: CDOT. ....	174
Tabla 33. Matriz genérica de orígenes y destinos. ....	186
Tabla 34. Parámetros utilizados en el modelo de reparto modal para usuarios no captivos del transporte público. Fuente: Mcrit, 2008.....	196
Tabla 35. Motivo de desplazamiento según modo de transporte en Barcelona. Fuente: EMEF 2016 .....	209
Tabla 36. Valor del tiempo en base a encuestas de tramo entre usuarios de Trambaix y Trambesós 2009. Fuente: Autoritat del Transport Metropolità de Barcelona. ....	210
Tabla 37. Datos básicos del escenario base de tráfico de la ciudad de Barcelona.....	212
Tabla 38. Resultados obtenidos en la red básica de transporte tras simular un escenario de peaje de 9 cts/km. ....	213
Tabla 39. Resultados obtenidos en la red secundaria tras simular un escenario de peaje en la red básica de 9 cts/km. ....	213
Tabla 40. Resultados obtenidos en la red básica de transporte tras simular un escenario de peaje de 16 cts/km. ....	215
Tabla 41. Resultados obtenidos en la red secundaria tras simular un escenario de peaje en la red básica de 16 cts/km. ....	216
Tabla 42. Resultados obtenidos en la red básica de transporte tras simular un escenario de peaje de 30 cts/km. ....	217
Tabla 43. Resultados obtenidos en la red secundaria tras simular un escenario de peaje en la red básica de 30 cts/km. ....	217
Tabla 44. Tiempos de viajes en algunos itinerarios utilizando vías de la red secundaria.....	218
Tabla 45. Valores promedio del reparto modal en la red secundaria para los diferentes escenarios tarifarios .....	218
Tabla 46. Beneficios obtenidos por los viajeros en vehículo privados que utilizan la red de peaje urbano.....	226
Tabla 47 Pérdida anual del bienestar de los viajeros en vehículo privado que no usan la red de peaje .....	227
Tabla 48. Duración media percibida de los desplazamientos por los residentes de Barcelona. Fuente: EMEF 2016 .....	228
Tabla 49. Pérdida del bienestar anual de los viajeros en vehículo privado que pasan al transporte público.....	229
Tabla 50 Pérdida anual del bienestar de lo viajeros desplazados del área intra-rondas .....	229
Tabla 51. Ahorro en los costes de funcionamiento del vehículo privado.....	230
Tabla 52. Viajes anuales según medio de transporte público en Barcelona. Fuente: TMB (Transports Metropolitans de Barcelona, S.A.) .....	231
Tabla 53. Viajes anuales por unidad de modo de transporte público en Barcelona. ....	232
Tabla 54. Viajes diarios transferidos por el peaje urbano al transporte público obtenidos al aplicar al modelo de reparto modal. ....	232
Tabla 55. Viajes diarios transferidos por el peaje urbano hacia el autobús y medios ferroviarios obtenidos al aplicar el modelo de reparto modal.....	232

Tabla 56. Viajes anuales transferidos por el peaje urbano a los diferentes modos de transporte público obtenidos al aplicar el modelo de reparto modal. ....	232
Tabla 57. Unidades de nuevos vehículos necesarios para absorber la nueva demanda de transporte público tras aplicar el peaje urbano. ....	233
Tabla 58. Costes totales de los nuevos vehículos de transporte público necesarios para atender la nueva demanda de transporte público generada por el peaje urbano. ....	233
Tabla 59. Costes anuales de los nuevos vehículos de transporte público necesarios para atender la nueva demanda de transporte público generada por el peaje urbano. ....	233
Tabla 60. Costes anuales de operación y mantenimiento de los nuevos vehículos de transporte público necesarios para atender la nueva demanda de transporte público generada por el peaje urbano. ....	234
Tabla 61. Efectos del peaje urbano sobre la salud de las personas. ....	235
Tabla 62. Toneladas de PM <sub>10</sub> evitadas al año por el peaje urbano en Barcelona. ....	236
Tabla 63. Toneladas de NO <sub>x</sub> evitadas al año por el peaje urbano en Barcelona. ....	236
Tabla 64. a) Número de vehículos en la ciudad de Barcelona. b) Evolución de la velocidad de circulación en Barcelona. Fuente: Ayuntamiento de Barcelona. ....	238
Tabla 65. Beneficio del ahorro en el cambio climático. ....	240
Tabla 66. Beneficio del ahorro en el ruido. ....	240
Tabla 67. Beneficio del ahorro en la polución. ....	240
Tabla 68. Desglose de los beneficios y costes en millones de euros para el primer año del sistema de peaje urbano en Barcelona. ....	241
Tabla 69. Resumen de los beneficios y costes en millones de euros para el primer año del sistema de peaje urbano en Barcelona. ....	242
Tabla 70. Número de viajes traspasados desde la red básica a la red secundaria según el modelo de tráfico y valores empleados para el análisis de sensibilidad. ....	244
Tabla 71. Resumen del rango de valores de las variables aleatorias definidas. ....	245
Tabla 72. Rango de beneficios socioeconómicos durante el primer año con una probabilidad de ocurrencia del 80% ....	248
Tabla 73. Resultados rentabilidad socioeconómica del proyecto a 10 años para T=9 cts/km. Elaboración propia. .	249
Tabla 74. Resultados rentabilidad socioeconómica del proyecto a 5 para T=16 cts/km. Elaboración propia. ....	249
Tabla 75. Resultados rentabilidad socioeconómica del proyecto a 5 y 10 años para T=30 cts/km. Elaboración propia ....	250
Tabla 76. Recaudación anual para el primer año por la aplicación de la tasa por congestión. ....	254
Tabla 77. Pérdida de ingreso por combustible ....	255
Tabla 78. Coste anual seguros para autobús y medios ferroviarios. ....	256
Tabla 79. Incremento de coste debido al transporte público adicional. ....	256
Tabla 80. Cuenta de explotación peaje urbano Barcelona tarifa 9 cts/km. Fuente: elaboración propia. ....	257
Tabla 81. Rentabilidad del proyecto a 10 años y tarifa que hace el VAN=0 para escenario tarifario 9 cts/km ....	257
Tabla 82. Cuenta de explotación peaje urbano Barcelona tarifa 16 cts/km. Fuente: elaboración propia. ....	258
Tabla 83. Rentabilidad del proyecto a 10 años y tarifa que hace el VAN=0 para escenario tarifario 16 cts/km. ....	258
Tabla 84. Cuenta de explotación peaje urbano Barcelona tarifa 30 cts/km. Fuente: elaboración propia. ....	258

Tabla 85 Rentabilidad del proyecto a 10 años y tarifa que hace el VAN=0 para escenario tarifario 30 cts/km .....	259
Tabla 86. Rango de valores de las variables aleatorias definidas.....	260

## LISTA DE ABREVIATURAS

ACB	: Análisis coste beneficio
AEMA:	: Agencia Europea del Medio Ambiente
AEPD	: Agencia Española de Protección de datos
ALS	: Area Licensing Scheme
AMB	: Área Metropolitana de Barcelona
AMTU	: Asociación de municipios por la movilidad y el transporte
ANPR	: Automatic Number Plate Recognition
ARF	: Additional Registration Fee
ASPB	: Agencia de salud pública de Barcelona
BPR	: Bureau of Public Roads
CBA	: Cost Benefit Analysis
CBD	: Central business district
CDOT	: Colorado Department of Transportation
CDR	: Conference of European Directors of Roads
CE	: Comunidad Europea
CEN	: Comité Européen de Normalisation
CO	: Monóxido de carbono
COE	: Certificate of Entitlement
COVN	: Compuestos orgánicos volátiles no metálicos
CUCB	: Continuo urbano central de Barcelona
C-V2X	: Cellular vehicle-to-everything
DSRC	: Dedicated short-range communications
EETS	: European Electronic Toll Service
EMAS	: Expressway Monitoring and Advisory System
EMEF	: Encuesta de movilidad en día laborable
ERP	: Electronic Road Pricing
ETC	: Electronic Toll Collection
EU	: European Union
EUA	: Estados Unidos de América
FGC	: Ferrocarrils de la Generalitat
GLIDE	: Green Link Determination System
GNSS	: Global Navigation Satellite System
GPRS	: General Packet Radio Service
GPS	: Global Positioning System
GSM	: Global System for Mobile communications
HC	: Hidrocarburos
HDB	: Housing and Development Board
IEC	: International Electrotechnical Commission
ISO	: International Organization for Standardization
ITS	: Intelligent Transportation System
IU	: In-vehicle Unit
JDTT	: Join Distance and Time Toll
LCCS	: London Congestion Charging Scheme
LRT	: Light Rail Transit
LTA	: Land Transport Authority of Singapore
MPEC	: Mathematical programming with equilibrium constraint
MRT	: Mass Rapid Transit
NFC	: Near Field Communication
NOx	: Óxidos nitrosos
OASIS	: Operación de Autopistas Seguras Inteligentes y Sostenibles
OBU	: On-Board Unit
OCR	: Optical Character Recognition
OMS	: Organización Mundial de la Salud

OPC	:	Off-Peak Car
ORT	:	Open Road Tolling
PARF	:	Preferential Additional Registration Fee
PIB	:	Producto Interior Bruto
PM	:	Partículas en suspensión
ROPC	:	Revised Off-Peak Car
SAI	:	Sistema de alimentación ininterrumpida
SAIT	:	Sistema de evaluación de inversiones de transporte
SC	:	Subsistema de cobro
SCI	:	Subsistema de control e infracción de paso
SFCTA	:	San Francisco County Transportation Authority
SIT	:	Sistemas inteligentes de transporte
SLV	:	Subsistema de localización vehicular
STI	:	Sistema de Transporte Integrado
SUE	:	Stochastic User Equilibrium
TDM	:	Travel Demand Management
TfL	:	Transport for London
TIR	:	Tasa interior de retorno
TMB	:	Transports Metropolitans de Barcelona
UE	:	User Equilibrium
VAN	:	Valor actualizado neto
VKT	:	Vehículos kilómetros
VOT	:	Value of Time
VQS	:	Vehicle Quota System
WEC	:	Weekend Car
WEZ	:	Western Extension Zone
ZBE	:	Zona de bajas emisiones
ZTL	:	Zona de tráfico limitado

## LISTA DE SIMBOLOS

$v_{ij}$	: Tasa de viajes entre cada par $ij \in W$
$D_{ij}(C_{ij})$	: Demanda entre el par O-D $ij \in W$ donde $C_{ij}$ es el coste del viaje para ir desde el origen $i$ hasta el destino $j$
$g_{ij}^r$	: Coste generalizado del viaje entre el par O-D $ij \in W$ por ruta $r$
$f_{ij}^r$	: Costes de operación vehicular dado en (€/viaje, o €/veh-km)
$t_{ij}^r$	: Tiempo medio que se gasta en realizar el viaje (h) por la ruta $r$
$\tau_{ij}^r$	: Gastos de peaje en que se incurre al viajar por la ruta $r$ entre el par O-D $ij \in W$
$Cst$	: Coste social total
$g_a^0(p, k)$	: Coste generalizado del arco $a$ para una renta $r$ y medio $k$
$\hat{w}$	: Medida del bienestar entre la población estudiada
$D_{ij}^{-1}(\omega)$	: Función inversa de la demanda
$D_{ij}(g_{ij})$	: Demanda entre el par O-D $ij \in W$ como función con respecto al coste generalizado del viaje
$B_{ST}$	: Excedente social o beneficio económico neto
$q_a$	: Flujo sobre el arco $a \in A$
$\varphi_{ij}^r$	: Flujo en la ruta $r \in R_{ij}, ij \in W$
$R_{ij}$	: Conjunto de rutas posibles entre el par O-D $ij \in W$
$\delta_{ij}^{a,r}$	: Variable binaria que toma el valor 1 si la ruta $r$ usa arco $a$ y 0 en caso contrario
$\tau_a$	: Peaje en el arco $a \in A_\tau$ , donde $A_\tau$ es el subconjunto de arcos de la red que tienen peaje tal que ( $A_\tau \subset A$ ).
$g_a(q_a, \tau_a)$	: Coste generalizado para el arco $a \in A$
$\bar{A}$	: Accesibilidad media
$p_k$	: Proporción de población en la zona $k$
$I_i$	: Ingreso de transporte acumulado en el grupo $i$
$T_{ij}$	: Viajes desde el origen $i$ con destino $j$
$P_i$	: Número de viajes generados en la zona “ $i$ ”, del paso generación de viajes
$A_j$	: Número de viajes atraídos a la zona “ $j$ ”, del paso generación de viajes
$f(c_{ij})$	: Función de impedancia permite que los viajes menos convenientes sean castigados
$q_a^0(r, k)$	: Demanda actual en el arco $a$ expresada en (veh/día o viajes/día), para un nivel de renta $r$ para una categoría de vehículos $k$
$f_{ij}^{0,p}(r, k)$	: Flujo actual para una categoría de vehículos $k$ según el nivel de renta $r$ en la ruta $p \in P_{ij}$
$T_r$	: Tiempo total de viaje en un segmento $r$
$TF_r$	: Flujo libre en un segmento $r$
$Flow_r$	: Volumen de tráfico
$Capacity_r$	: Capacidad del segmento $r$
$\alpha, \beta$	: Parámetros de tráfico/retardo
$\gamma$	: Efecto en la reducción de la velocidad debido al tráfico opuesto en carreteras con carriles no separados
$gc_{OD}^m$	: Coste generalizado entre origen y destino para un modo $m$
$Eu$	: Excedente del conjunto de viajeros

$g_{ij}^r$	:	Coste generalizado sobre la ruta $r$ que une el origen $i$ y destino $j$
$t_a$	:	Viaje en flujo libre en el segmento $a$
$c_a$	:	Capacidad del segmento $a$
$D(j,s)$	:	Flujo originado en el nodo $j$ con destino $s$
$x_{ij}$	:	Flujo total a lo largo del arco $(i,j)$
$x_{ij}^s$	:	Flujo en el arco $(i,j)$ con destinación $s$
$I_T^0$	:	Recaudo bruto total en la situación actual
O-D	:	Origen-destino
$U_{ji}$	:	Utilidad asociada a cada modo $j$ para el par OD $i$ .
$B_{vpp}$	:	Beneficio anual obtenido por los vehículos privados que utilizan la red de peaje urbano
$P_{bvp}$	:	Pérdida de bienestar anual de los viajeros en vehículo privado que no utilizan el peaje urbano
$P_{btp}$	:	Pérdida de bienestar anual de los viajeros en vehículos privados que pasan al transporte público
$P_{bs}$	:	Pérdida diaria de bienestar de los viajeros desplazados del área intra-rondas

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante muchos años, se habían considerado las políticas de aparcamientos aplicadas en el centro de las ciudades como una de las mejores herramientas para gestionar la demanda de viajes (TDM)<sup>1</sup> (Young, et al., 1991). Las políticas de aparcamiento, tales como prohibiciones y tarifas de estacionamiento, se habían convertido en muy populares entre muchos planificadores del transporte y responsables políticos, debido a su bajo coste y facilidad de implementación (Sattayhatewa & ; Smith, 2003). Sin embargo, en las últimas décadas estas políticas no han sido suficientemente efectivas debido al continuo incremento en el uso del automóvil, elevada concentración de oficinas en los centros de las ciudades, amplia oferta de estacionamiento fuera de la calzada y falta de promoción de otros medios de transporte alterativos (como la bicicleta).

En Europa, el pasado 31 de diciembre de 2016 entró en vigor la Directiva de la Unión Europea 2016/2284 del Parlamento Europeo y del Consejo de 14 de diciembre de 2016 relativa a la reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos, por la que se modificó la Directiva 2003/35/CE y se derogó la Directiva 2001/81/CE. La nueva directiva obliga a los Estados miembros a limitar sus emisiones antropogénicas anuales durante el periodo 2020-2030, de acuerdo con los compromisos adquiridos, para evitar ser sancionados. El tráfico es, en muchas áreas urbanas, la principal fuente de emisión de gases contaminantes lo que hace que sea el centro de políticas ambientales dirigidas a cumplir con los niveles de contaminación comprometidos. En Barcelona, según el informe elaborado por la Agencia de Salud Pública de Barcelona (ASPB) “Evaluación de la calidad del aire en la ciudad de Barcelona”, se continúa constatando que se siguen superando los niveles recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de gases contaminantes. El informe indica que durante el año 2018 se produjeron en la ciudad de Barcelona 350 muertes prematuras atribuibles a la contaminación atmosférica y concluye con la necesidad urgente de implementar medidas más restrictivas para el tráfico motorizado, que ayuden a mejorar la calidad del aire y a proteger la salud de las personas. Es en este contexto donde cada vez más ciudades tratan de aplicar medidas dirigidas a frenar el uso del vehículo privado. Algunas de ellas como las tasas por congestión, las áreas de tráfico restringido o incluso medidas de tipo integral como el modelo urbanístico de las “Supermanzanas<sup>2</sup>” en Barcelona todavía tienen que demostrar su valía, con carácter general, para aliviar la contaminación generada por el tráfico motorizado.

---

<sup>1</sup> TDM es la abreviatura en inglés de “Travel Demand Management” es un término general utilizado que describe las estrategias y políticas destinadas a fomentar un uso más eficiente de los recursos de transporte (carretera y espacio de estacionamiento, capacidad del vehículo, financiación, energía, etc.). Estas estrategias apuntan hacia el uso de sistemas de transporte más sostenible, cada una de la cuales utiliza diferentes conceptos y recursos para la gestión de la demanda.

<sup>2</sup> Una supermanzana es un espacio urbano que, a diferencia de la manzana tradicional —un «espacio urbano, edificado o destinado a la edificación, generalmente cuadrangular, delimitado con calles por todos sus lados»— es, típicamente, una zona peatonal en la que se desarrollan actividades de ocio, o un complejo residencial de edificios rodeados de zonas ajardinadas y con tráfico limitado. Su extensión es menor que la del barrio tradicional.

Las tasas por congestión se han venido aplicando en determinadas infraestructuras de transporte para regular su demanda de uso y reducir las externalidades negativas generadas por dicha demanda. Este impuesto pigouviano<sup>3</sup> se suele aplicar cuando existe congestión en el uso de un bien público que los usuarios asumen debería ser gratuito (como es el caso de las carreteras). Últimamente su uso se ha comenzado a extender en el ámbito urbano con el fin de reducir los problemas de congestión de tráfico, disminuir la contaminación del aire y restringir las emisiones de gases de efecto invernadero. Las tasas o tarifas que pagan los automovilistas para poder utilizar la red viaria de determinadas ciudades son popularmente conocidas como “peajes urbanos”.

La mayoría de los expertos considera que la aplicación de peajes urbanos (como los aplicados en las ciudades de Londres, Oslo o Estocolmo) constituye uno de los mejores instrumentos disponibles para restringir el tráfico en el centro de las ciudades, aunque tienen algunos inconvenientes básicos cuando lo comparamos con el control de aparcamiento. Los cordones urbanos de peaje han sido implementados en pocos lugares debido a la dificultad técnica de su instalación (Albert and Mahalel, 2006). A pesar de ello, durante los últimos años los avances tecnológicos han hecho que más ciudades reconsideren su aplicación. En particular, cada vez existen más ciudades europeas que proponen su implementación, como solución eficaz, para cumplir con la mencionada Directiva Europea 2016/2284. Hoy en día, las últimas tecnologías de cobro de peajes abren la puerta a un mejor funcionamiento de estos peajes urbanos.

Si hacemos un breve repaso a la literatura, relativa a la aplicación de peajes urbanos en ciudades, encontramos que sus problemas son objeto de controversia tanto a nivel empírico como teórico. A nivel empírico, diferentes autores han evaluado los efectos de la aplicación de los peajes urbanos sobre la congestión del tráfico y la contaminación y han analizado los cambios en el comportamiento de los usuarios y residentes de Oslo (Larsen. O.I., 1995); Odeck, J., 2002), Singapur (Seik, 2000; Goh, 2002), Londres (Santos & Bhakar, 2006), Milán (Rotaris, Danielis, Marcucci, & Massiani, 2010) y Estocolmo (Eliasson, 2009; Börjesson, Eliasson, Hugosson, & Brundell-Freij, 2012).

Desde un punto de vista teórico, la vasta literatura relativa a la aplicación de tasas de congestión en cordones urbanos se ha concentrado en varios temas. Autores como (Giuliano, 1992; Schade and Schlag, 2003; Eliasson, 2006; Marklund and Samakovlis, 2007; Schuitema et al., 2009) estudian la capacidad de los peajes urbanos para generar ingresos, su viabilidad económica, su aceptabilidad entre los ciudadanos y su eficiencia en diversas zonas urbanas. Otros como (Afandizadeh, Yadak, & Kalantari, 2011; Beevers & Carslaw, 2005) se centran en el rendimiento de la red de transporte. (Bartin et al., 2007; Beevers and

---

<sup>3</sup> Los impuestos pigouvianos son un tipo de impuesto que busca corregir una externalidad negativa. Este impuesto es llamado impuesto pigouviano, en honor del economista británico Arthur Pigou, quien fue el primero en proponerlo. El efecto del impuesto es lograr que el coste marginal privado (lo que le cuesta al productor producir) más el impuesto sea igual al coste marginal social (lo que le cuesta a la sociedad, incluyendo al productor). Este impuesto no genera una pérdida en la eficiencia de los mercados, dado que internaliza los costos de la externalidad a los productores o consumidores, en vez de modificarlos. Muchos países han adoptado estos impuestos y los han aplicado, por ejemplo, a la contaminación (ecotasas) o a productos dañinos como el tabaco, como forma de solucionar los llamados fallos de mercado.

Carslaw, 2005) estudian la fiabilidad y los costes externos asociados a estos peajes, tales como el ruido del tráfico, los accidentes y la contaminación del aire. Por otro lado, autores como (Lian, 2008; A. D. May, Liu, Shepherd, & Sumalee, 2002; Mun, Konishi, & Yoshikawa, 2003; Santos, 2006; A. May, Shepherd, & Sumalee, 2004; R. Wang, 2010; X. Zhang & Yang, 2004) analizan los cambios de comportamiento de los viajeros cuando se aplican cordones urbanos que afectan a la hora de salida, la elección de ruta o la propia decisión de viajar. (Azari, Arintono, Hamid, & Davoodi, 2013) investigan cómo los viajeros pueden ajustar sus patrones de viaje típicos en respuesta a una tarifa por congestión. Usando análisis logístico, (Hu, S.; Saleh, 2005) investigan los impactos que tendría una tasa por congestión en Edimburgo. Por otra parte, (Arentze & Timmermans, 2007), como consecuencia de un experimento, estiman los impactos a largo plazo sobre los cambios de lugar de trabajo y de residencia cuando se aplica un peaje de cordón.

De los trabajos anteriores se puede concluir que la tarificación urbana puede ser una forma eficaz de regular la demanda en las zonas urbanas congestionadas y de mejorar la habitabilidad de las ciudades. El mayor coste generalizado del viaje lleva a una parte de los usuarios a cambiar a un modo de transporte diferente o a renunciar a realizar el viaje. La reducción en la demanda de tráfico genera un ahorro de tiempo para los usuarios dispuestos a pagar la tasa y una mayor previsibilidad en sus tiempos de recorrido. Sin embargo, los viajeros desplazados necesitan una mejora de la capacidad de los servicios de transporte público que debe ir asociada a campañas de promoción del mismo. Los peajes urbanos de Estocolmo y Londres son buenos ejemplos de una regulación exitosa de la demanda y han tenido una gran aceptación por parte de sus ciudadanos.

A pesar de estos casos, los ciudadanos en general se oponen a la tarificación por el uso de la red viaria urbana, ya que se percibe como una carga económica adicional sobre los impuestos que ya están pagando. Las empresas también suelen oponerse a la tarificación vial, ya que significa mayores costos de transporte. Las opiniones de los responsables políticos a menudo reflejan opiniones de los ciudadanos y empresas, pero los políticos también ven en los peajes urbanos un método atractivo de financiación para la administración local. Los peajes urbanos implantados han demostrado, sin embargo, que la aceptabilidad de la tarificación generalmente aumenta después de su puesta en funcionamiento. La razón de ello es que los ciudadanos experimentan los beneficios derivados de la disminución del tráfico en sus ciudades, así como de las inversiones posteriores, generalmente encaminadas a mejorar la movilidad, financiadas con los ingresos generados por estos peajes urbanos.

Para adaptar la ciudad a crecer menos en “riqueza” (en términos de PIB) pero más en “amabilidad” (o calidad de vida) hay que abrir la perspectiva actual, que siempre va detrás de una realidad que no se ha sabido prever suficientemente, intentando resolver problemas como el de la congestión. Para la nueva visión hay que distinguir entre las diferentes necesidades de ciudadanos y visitantes y adaptar los servicios de movilidad a estas necesidades. La única manera de hacerlo eficientemente es utilizando los mecanismos de mercado.

En esta tesis repasaremos el concepto y fundamento de los peajes urbanos, así como la experiencia existente de su aplicación a nivel internacional. Se expondrá la actual postura de la Unión Europea sobre los problemas derivados de la congestión en las grandes ciudades y cómo el concepto de “Ciudad Sostenible” puede ayudar a su solución.

Por otro lado, plantearemos un nuevo modelo de peaje urbano que propone una segregación de la red urbana de transporte según diferentes niveles de calidad. Los actuales peajes urbanos aplican una tarifa fija para acceder dentro del área central de la ciudad, sin tener en cuenta el uso real que se hace de la infraestructura urbana. El nuevo modelo permitiría tarificar a sus usuarios por la longitud real recorrida, posibilitando ligar la tarifa a las externalidades generadas en el viaje. Se hará hincapié en los sistemas tecnológicos necesarios que permitan la operación de este nuevo concepto.

Por último, analizaremos la viabilidad socioeconómica y financiera del nuevo modelo de peaje urbano propuesto en Barcelona.

## **2. OBJETIVOS**

Barcelona, que ha sido amenazada con sanciones por la Comisión Europea por sobrepasar los niveles de contaminación atmosférica regulados, ha anunciado medidas enfocadas a reducir la movilidad en transporte privado. Un ejemplo es la prohibición de circulación de los vehículos más antiguos de 20 años y la implantación, a partir del 2020, de la zona de bajas emisiones (ZBE). La ZBE impondrá multas a los vehículos más contaminantes que circulen por la zona restringida. Sin embargo, a pesar de la utilización creciente de los peajes urbanos y de restricciones de circulación, actualmente no existe una base extensa de estudios que analicen el posible impacto de estas medidas dentro del entorno de Barcelona. Este trabajo tiene como objetivo estudiar los efectos que tendría la implantación de un nuevo modelo de peaje urbano en la ciudad. Inicialmente centraremos la atención en el diseño conceptual del modelo para finalizar analizando su viabilidad socioeconómica y financiera. Es evidente que la complejidad del tema y la necesidad de información precisa y detallada exigirán la realización de un amplio estudio antes de tomar una decisión que, sin duda, tendrá un gran impacto político. Este estudio se sitúa muy por encima de las posibilidades del doctorando que, con su tesis, solo pretende establecer el contexto y una metodología adecuada para tratar el tema y ofrecer unos primeros resultados, basados en la información disponible, que sirvan de punto de partida para futuros estudios más ambiciosos, enfocados a profundizar en el análisis del impacto de esta medida que permitan mejorar o ampliar los resultados obtenidos en el presente trabajo

Los actuales sistemas de peaje urbano, como el de Londres, Estocolmo u Oslo, aplican al transporte privado tarifas fijas para acceder dentro del área central de la ciudad. Estos peajes no tienen en cuenta el uso real que el usuario hace de la infraestructura urbana. El sistema de control que utilizan se basa en la instalación de pórticos con cámaras que permiten reconocer la matrícula del vehículo a su paso. La cámara identifica la matrícula del automóvil y, si no se ha abonado la tarifa, el propietario es sancionado. En el nuevo modelo de peaje urbano propuesto el usuario debe pagar por el uso real que hace de la red urbana de transporte. Los usuarios abonan una tarifa ligada a la longitud real recorrida que se podría asociar a las externalidades generadas por el viaje. Además, en el modelo propuesto, la red viaria de la ciudad se segregaría en dos, una red básica de pago y otra secundaria, gratuita. La red de pago daría la posibilidad de circular a mayores velocidades dentro de la ciudad, al disponer de coordinación semafórica preferente e incluso, a medida que vaya evolucionando la tecnología, disfrutar de sistemas de guiado autónomos, carga eléctrica en movimiento, etc. La red secundaria gratuita, por el contrario, permitiría velocidades de circulación restringidas, en sus viales no se dispondría de coordinación semafórica y, en algunos casos (por ejemplo, en el interior de las “supermanzanas”) la señalización de las calles se dispondría de tal manera que la distancia a recorrer entre dos puntos sería mucho mayor que si se hiciera por los viales de pago.

Nuestro objetivo, por tanto, será realizar un primer análisis de cómo este nuevo concepto de movilidad puede ayudar a reducir los niveles de tráfico y mejorar el entorno urbano de la ciudad. La finalidad del peaje urbano será ayudar a mejorar la salud de las personas y el medioambiente, además de lograr ingresos

que puedan revertir en la mejora del transporte público urbano. El nuevo concepto de peaje se aplicará a la ciudad de Barcelona utilizando un modelo de transporte tradicional de cuatro etapas, con el que se simularán los escenarios futuros tras la aplicación de la tarifa. Con ello se pretende averiguar la tarifa de peaje urbano necesaria para conseguir una reducción de tráfico que permita cumplir con los estándares mínimos de calidad del aire fijados por la Unión Europea.

Otro de los objetivos del estudio será analizar y plantear la tecnología que necesitaría este nuevo modelo de peaje urbano. Los últimos avances tecnológicos, tanto en cámaras de reconocimiento de matrículas como en sistemas de posicionamiento GPS, hacen que sea posible aplicar este nuevo esquema tarifario. En líneas generales, el nuevo modelo de peaje requeriría de un sistema de localización de vehículos (GNSS), basado en Galileo, capaz de transmitir los datos mediante comunicaciones móviles, como las C-V2X (5G) que darían la posibilidad de que los automóviles se comunicaran no sólo con el equipamiento urbano inteligente sino también con peatones, vehículos, y redes móviles para tener conectividad de red. Gracias a este nuevo sistema de comunicaciones el vehículo no sólo incorporaría los datos de su propio viaje, sino que podría incorporar datos de la propia infraestructura (estado de los semáforos, contaje de espiras, parámetros ambientales de las estaciones meteorológicas, etc.). El despliegue del 5G seguramente ofrecerá posibilidades, por lo menos complementarias, al sistema propuesto. En todo caso el rápido avance de las telecomunicaciones hace que sea solo en el momento de la implementación del peaje cuando pueda concretarse la tecnología más idónea. Lo relevante en el momento es demostrar que ya existe actualmente la posibilidad de materializar el proyecto desde el punto técnico.

Por último, a partir de las estimaciones de coste, demanda con las distintas tarifas, y tiempos de recorridos, en particular, se realizará un análisis de la viabilidad socioeconómica y financiera del nuevo modelo de peaje urbano. Por otra parte, se hará una propuesta de implementación viendo, en particular, como puede ser su encaje dentro de la propuesta urbanística de “supermanzanas” desarrollada por el Ayuntamiento de Barcelona.

### 3. ESTADO DEL ARTE

#### 3.1 Concepto y fundamento de los peajes urbanos

Es posible distinguir funcionalmente entre una carretera fuera de poblado, una carretera urbana y una calle de la ciudad. A todos los efectos, y para diferenciarlas de las calles, se considera que las carreteras “canalizan movimientos de paso o de acceso provenientes del exterior de la ciudad cuya intensidad, si bien puede ser inferior a la de los vehículos estrictamente urbanos, no deja de ser apreciable”<sup>4</sup>. Para diferenciarlas de las carreteras fuera de poblado se considera que las carreteras urbanas, que englobarían las denominadas travesías<sup>5</sup> de población, presentan las siguientes características:

- Son utilizadas parcialmente por tráfico urbano.
- Atraviesan áreas urbanas consolidadas o previstas por el ordenamiento urbanístico.
- Generan impactos ambientales sobre el medio urbano próximo.

#### Concepto de peaje urbano

El concepto moderno de peaje urbano, que deriva del más general de peaje viario, podría definirse como “cualquier tipo de tasa o tarifa que se aplica a los automóviles por la utilización del viario en un ámbito urbano” (Pozueta Echavarrí, 2008).

Cuando hablamos de peaje urbano nos podemos referir al pago por uso de ciertas vías o bien del conjunto del viario de una determinada zona urbana. Para la primera situación, el peaje se suele aplicar a vías rápidas, de dos o más carriles por sentido de circulación, con separador central y con accesos y salidas controladas a través de puentes elevados o deprimidos, túneles u otro tipo de estructuras que permiten superar ciertas barreras físicas dentro de la ciudad y cuyo uso representa grandes ahorros de tiempo. En cambio, para la segunda situación, nos solemos encontrar peajes urbanos para acceder a una determinada zona o área de la ciudad.

Dentro de estas dos situaciones posibles, es habitual aplicar tipologías tarifarias diferentes. En el caso de las autopistas urbanas se suelen aplicar peajes basados en tarifas kilométricas, mientras que, en el caso de accesos a determinadas zonas de la ciudad, lo habitual es aplicar una tarifa fija que puede estar relacionada con el tiempo de estancia dentro de la zona. En el presente trabajo plantearemos una tercera situación, una tarifa kilométrica asociada a un mejor servicio por el uso del viario urbano. La nueva tarifa implicaría un servicio viario de mayor calidad ligado a la posibilidad de circular a mayores velocidades con una regulación semafórica prioritaria.

---

<sup>4</sup> Definición de carretera urbana- “1992- Carreteras Urbanas. MOPT. Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Dirección General de Carreteras”.

<sup>5</sup> La Real Academia Española define travesía como parte de una carretera comprendida dentro del casco de una población.

El fundamento originario de los peajes viarios modernos ha sido la financiación de la construcción de carreteras. Es decir, han tenido como función transmitir a los usuarios, en mayor o menor medida, el coste de la construcción y la explotación de carreteras y autopistas o de algunos de sus elementos singulares (puentes, túneles, “by-passes”<sup>6</sup>). Los peajes viarios, como método de financiación de carreteras, constituyeron una alternativa a su financiación directa por la administración responsable. Una alternativa que permite aumentar la capacidad de construcción de carreteras, antes limitada a los recursos de la administración y que, simultáneamente, introduce el concepto del “pago por uso” en los servicios e infraestructuras públicas, ya que, mediante su aplicación, el coste de la infraestructura se carga directamente a los usuarios, frente al sistema tradicional, en el que se financian con cargo a los presupuestos generales y su coste se carga, por tanto, a todos los contribuyentes, sean o no usuarios de las mismas<sup>7</sup>. En el caso de los peajes urbanos como los aplicados en los países nórdicos, que veremos más adelante con mayor detalle, los ingresos generados revierten en la construcción de infraestructuras y en la mejora de la movilidad urbana.

La estrategia de cargar el coste de nuevas infraestructuras de transporte al usuario mediante un peaje y no a través de los presupuestos generales de la administración pública, en general, ha sido aceptada por los ciudadanos. Por el contrario, implantar un peaje en una carretera o vía existente, que antes era gratuita, no goza de la misma aceptación ya que no se puede argumentar que el peaje corresponda al coste de construcción de la carretera. En el caso de los peajes urbanos, no es diferente y su aceptación mejora cuando se explica que parte de los ingresos recaudados serán empleados en la mejora del transporte público o en el desarrollo de proyectos de movilidad urbana. (Börjesson, Eliasson, Hugosson, & Brundell-Freij, 2012) indican que un factor esencial para lograr el apoyo político ciudadano es integrar los ingresos generados por el peaje urbano en la mejora de sus sistemas de transporte público. Podemos decir que, básicamente, los tres objetivos principales que sirven para justificar los peajes viarios y, en particular, los urbanos suelen ser:

- 1) Generar un sistema de obtención de recursos económicos para financiar la construcción de nuevas infraestructuras (incluyendo las de transporte público). Este concepto es una extensión del concepto tradicional de peaje viario. Es el caso, por ejemplo, de los primeros peajes urbanos noruegos, diseñados para poder financiar más rápidamente las redes de autopistas urbanas de sus grandes ciudades.
- 2) Gestionar la demanda de tráfico para, por ejemplo, reducir la congestión circulatoria. Con la ayuda del peaje se puede optimizar la eficiencia del sistema de movilidad implantando diferentes esquemas tarifarios.
- 3) Minimizar los impactos ambientales del transporte e internalizar los costes externos del tráfico (por ejemplo, los causados por la contaminación, ruido y congestión). De esta forma se hace recaer sobre el usuario, en forma de pago monetario, las externalidades generadas por la circulación vehicular para

---

<sup>6</sup> By-pass: del inglés derivación. Es un camino o carretera que evita o “no pasa” por una zona urbanizada, ciudad o pueblo, para dejar pasar el flujo de tráfico sin interferencia de tráfico local.

<sup>7</sup> España invirtió en el año 2016, según datos del Ministerio de Fomento del Gobierno de España, 3.708,90 millones de euros en infraestructuras de transporte por carreteras, lo que representa aproximadamente una inversión del 0.33 % respecto de su PIB en 2016.

compensar dichas externalidades. Durante los últimos años ha ido cristalizando en la sociedad la percepción de los efectos negativos generados por la congestión en las ciudades. Ello debería reducir la oposición a la aplicación de tasas por congestión, en particular en las áreas donde ésta tiene efectos más perniciosos: los centros urbanos.

A continuación, se muestra un resumen con los principales instrumentos de tarificación y sus objetivos:

Objetivo	Instrumento de tarificación	Destino de los ingresos	Cumplimiento de objetivos	Otros impactos
Pagar por el uso de la Infraestructura	Concesiones de autopista con peajes	Financiación directa de la construcción y explotación de la Infraestructura	Cobertura del 100% de los costes derivados de la concesión	Transferencia de tráfico a carreteras no sometidas a peaje
	Tarificación basada en el tiempo	Financiación directa del operador de la Infraestructura	Cobertura parcial de los costes de la red	Sistema de tarificación sin una relación directa con el uso real de la Infraestructura
	Tarificación basada en la distancia real recorrida	Financiación directa del operador de la Infraestructura	Cobertura de los costes de la red	Sistema fuertemente dependiente de la tecnología (GPS, Galileo) Punto de partida útil para introducir otros instrumentos de tarificación Problemas relacionados con el derecho a la privacidad
Reducir los niveles de tráfico en áreas sensibles	Tasas de congestión	Financiación del transporte público Financiación de políticas medioambientales	Cobertura proporcional según la cuantía de la tasa Eficiencia decreciente al adaptarse progresivamente el mercado a la tasa	Efecto combinado de la tarificación y del transporte público Riesgo de distorsiones en el mercado según la política medioambiental elegida
Generar Ingresos	Impuestos sobre los carburantes	Presupuestos públicos	Sistema de generación de Ingresos altamente eficiente	Sistema eficiente para tarificar las emisiones de CO <sub>2</sub> Distorsiones para discriminar convenientemente el binomio usuario-pagador del Impuesto Carece de un verdadero efecto disuasorio al tráfico rodado
Limitar las emisiones de gases de efecto Invernadero	Esquemas de intercambio de derechos de emisión de CO <sub>2</sub>	Derechos de emisiones negociados en un mercado abierto	Mecanismo de tarificación efectivo	Efecto inductivo sobre el I+D en tecnologías reductoras de las emisiones El precio por unidad de derecho de emisión es irrelevante del número de derechos de emisión transferidos

Tabla 1. Instrumento de tarificación y sus objetivos. Fuente: CDR<sup>8</sup>, 2009.

### 3.2 Origen de los peajes urbanos

Según (Wachs, 2005) el concepto moderno<sup>9</sup> de peaje viario o “road pricing” surge en EUA en los años 20 de la mano de las reflexiones de economistas como A.C. Pigou o F. Knight y sería desarrollado en

<sup>8</sup> CDR: Conference of European Directors of Roads 2009.

<sup>9</sup> Desde la Edad Media hay referencias históricas del cobro de peajes, portazgos para la travesía de caminos, y particularmente, de puentes que atravesaban o pertenecían a señorías laicos o eclesiásticos. Los peajes eran una de las principales limitaciones a los desplazamientos en aquella época. De ahí, por ejemplo, que una de las acciones combinadas de Alfonso X de Castilla y de Sancho I de Navarra para facilitar el flujo de peregrinos por el Camino de Santiago fuera aliviar los peajes (GARCIA, 2000). En los siglos XIV y XV “los monarcas europeos empezaron a planificar las rutas y a tomar medidas para el arreglo y conservación de los caminos; para ello establecieron tributos especiales, los peajes, y encargaron la redacción de proyectos de mejora de las rutas más importantes” (MOLINA, 1999).

profundidad, en los 60 y los 70, por expertos como W. Vrickey. Podemos decir que uno de los primeros trabajos de partida fue el de Arthur Pigou en 1920 “The Economic of Welfare” (Pigeou, 1920) dónde argumentó que la existencia de externalidades era una justificación suficiente para la intervención del Gobierno y propuso un impuesto, llamado en su honor impuesto pigouviano, que buscaba corregir las externalidades negativas generadas por un productor (Pahaut & Sikow, 2006).

En Europa, el debate sobre la posibilidad de establecer peajes urbanos se desarrolla simultáneamente al norteamericano, pero su primera consideración para una aplicación sistemática se produjo en Inglaterra en los años sesenta con el llamado Informe Smed de 1964 “peajes urbanos: posibilidades técnicas y económicas” (Ministry of Transport, 1964). El Informe concluía en unas recomendaciones, que todavía son, en gran medida, la base de las concepciones actuales<sup>10</sup> (Pozueta Echavarrri, 2008). A pesar de iniciarse el debate en Inglaterra, fue la ciudad Bergen, en 1986, la primera que aplicó un sistema de peaje urbano cuyo principal objetivo, no fue la reducción de tráfico, sino la obtención de fondos para financiar nuevas carreteras.

Continuando esa línea de trabajo, en 1974, el “Greater London Council” realiza un estudio, denominado “Supplementary licensing”, donde se contempla el establecimiento de un cordón de peaje, dentro del “Inner Ring Road”<sup>11</sup>, en cuya entrada se cobrarían 5 libras esterlinas (en su equivalente de 2003), el triple para camiones, entre las 7:00h y las 19:00h, estimando los gastos de funcionamiento en un 15% de los ingresos, una reducción del tráfico entrante en un 45% y un incremento de la velocidad en un 40%.

No sin cierta sorpresa, las primeras iniciativas serias para implantar peajes urbanos surgieron en Asia, en el Extremo Oriente, con la inauguración del “Área Licensing Scheme” de Singapur, en 1975, y las pruebas fallidas para un sistema similar en Hong-Kong, en 1983. En Europa, no fue hasta 1986 con la inauguración del denominado “Toll Ring” de Bergen (Noruega), cuando se aplicaron por primera vez tasas por congestión en zonas urbanas. Posteriormente, ciudades como Londres, Estocolmo u Oslo aplicarían iniciativas parecidas.

Sorprende que, aunque el debate de las tasas por congestión tuviera sus orígenes en Occidente, fuera Oriente quien implementara por primera vez la medida en Singapur. En el caso de Singapur, debido a su reducido territorio y a sus altísimas tasas de motorización, su Gobierno decide en 1972 establecer una importante tasa por la posesión de automóviles. Complementariamente a esta medida, en 1975 decide aplicar una tasa por congestión a aquellos vehículos que quisieran acceder a la ciudad los días laborables entre las 7:30h y las 9:30h. Singapur presentaba un régimen político no democrático con una administración centralizada en

---

<sup>10</sup> Eran las siguientes: los peajes deben estar estrechamente relacionados con el uso del viario, se deben poder variar para diferentes áreas, horas y tipos de vehículos; deben ser estables y estar disponibles para el usuario antes del inicio del viaje; debe permitirse el pago por anticipado, aunque también, ofrecerse facilidades de crédito; sus efectos sobre los usuarios individuales deben aceptarse como justos; el sistema debe ser fácil de entender por los usuarios; las instalaciones deben ser altamente fiables; no debe haber posibilidad de fraude o evasión, deliberada o inconsciente; deben ser susceptibles de aplicación, si fuera necesario, a todo el país.

<sup>11</sup> Es una carretera de circunvalación interior de Londres con una longitud de 19 km formada por una serie de carreteras principales que rodea el centro de Londres.

un único nivel, el nacional, donde las decisiones debían ser acatadas por la población sin ser sometidas a debate ni poder ser objeto de contestación. Probablemente, este régimen político fuera la causa por la que el Gobierno de Singapur pudo aplicar la medida tan precozmente.

Hong Kong, por su parte, compartía con Singapur la escasez de suelo y un rápido crecimiento de la motorización, pero lo que frenó finalmente la implantación de su peaje urbano fue, precisamente, la ausencia de una de las facilidades que tuvo Singapur, ya que Hong Kong gozaba de un sistema político de libertades que, por dos veces, en 1985 y en 2001, aconsejó a los políticos su rechazo.

En sus más de cuarenta años de historia podemos decir que los peajes urbanos se han ido poco a poco consolidando en la sociedad. A continuación, sintetizamos algunos de sus hitos cronológicos más relevantes:

- En 1975 se pone en marcha el peaje urbano de **Singapur**. Inicialmente su funcionamiento fue manual mediante la compra de un ticket a la entrada de la ciudad. Este ticket se debía colocar en un lugar visible del vehículo para que los agentes pudieran visualizarlo con facilidad. En 1998 se sustituye el sistema de ticket por un peaje electrónico que automatiza el proceso.
- En 1983-85 ante el éxito de la experiencia de Singapur, se realizan estudios y pruebas reales en **Hong-Kong**, pero el sistema fue finalmente cancelado en 1985 tras un rechazo unánime de los “district boards” (juntas de distrito). Estas juntas fueron órganos de participación vecinal a quienes se le consultó sobre la aceptabilidad del proyecto.
- En 1986 se inaugura en Noruega el “Toll Ring” de **Bergen**. El objetivo de este peaje urbano fue obtener fondos para la construcción de una red de carreteras que evitara el tráfico comarcal por el centro de la ciudad de Bergen. Con esta medida, Bergen fue la primera ciudad nórdica que implantó un peaje urbano con el objetivo de obtener recursos económicos para impulsar un amplio programa de inversiones de transporte. El sistema, con una tarifa inicial relativamente reducida, se basaba en la tecnología convencional utilizada en los peajes por carretera y permitía el pago con monedas.
- En 1989 la ciudad italiana de **Roma** cierra su centro histórico al tráfico para los no residentes. El sistema, más que un peaje urbano, era un control de accesos para limitar la entrada de vehículos al centro histórico de la ciudad.
- En 1990 la ciudad nórdica de **Oslo** pone en funcionamiento un peaje urbano tipo cordón con una tecnología capaz de realizar el pago de la tarifa electrónicamente. Posteriormente, en 1992 lo hace la ciudad de **Trondheim**. Los objetivos perseguidos por estos peajes urbanos eran similares a los de Bergen y pretendían obtener recursos económicos para la financiación de carreteras y mejorar el sistema de transporte público de la ciudad.
- En la ciudad alemana de **Stuttgart**, entre mayo 1994 y febrero de 1995, se llevó a cabo un

experimento que pretendía analizar el impacto de la implantación de un peaje urbano tipo cordón sobre los itinerarios y rutas de los conductores de la ciudad. La conclusión fue que los conductores modificaban sus itinerarios buscando siempre el itinerario más económico.

- A finales de 1997 se implanta en Noruega otro peaje urbano tipo cordón en la ciudad de **Kristiansand**.
- En 1998 la ciudad de **Singapur** finaliza la automatización de todo su sistema (ERP) mediante la disposición de transpondedores<sup>12</sup> en la mayoría de los vehículos. Por su parte Roma moderniza su sistema instalando putos de control, permitiendo el acceso a vehículos no residentes previo pago de una tarifa anual.
- En 1999 se inicia en **Santiago de Chile** el programa de autopistas urbanas con la construcción de la vía Costanera Norte. Posteriormente y hasta el 2005 se sigue con la construcción de otras autopistas urbanas de peaje (Autopista Central, Vespucio Sur, Vespucio Norte Expres).
- En 2001 se inaugura en **Stavanger**, ciudad portuaria ubicada al sudoeste de Noruega de unos 162.000 habitantes, un sistema de peaje urbano tipo cordón con una tecnología que permitía el pago electrónico de la tarifa. El peaje fue aprobado para que inicialmente estuviera en funcionamiento durante un período de 10 años. El sistema debía contribuir a financiar alrededor del 41% del coste de un paquete de inversiones en carreteras, transporte público y seguridad viaria en la ciudad. El esquema de peaje constaba de 21 estaciones de peaje situadas a lo largo de las fronteras del condado en sus carreteras principales. La tarificación se aplicaba al tráfico entrante de lunes a viernes de 6:00 a.m-6:00 p.m. Se estipuló una tarifa más elevada entre las 7:00h y las 10:00h y entre las 14:00h a 17:00h. Los ingresos brutos anuales del peaje en 2002 fueron de más de ocho millones de euros con un coste anual de operación de algo más de dos millones de euros, aproximadamente el 26% de los ingresos.
- En octubre de 2002 se inaugura en la ciudad de **Durham** la primera tasa por congestión del Reino Unido para restringir el acceso de vehículos al casco histórico de la ciudad. La tasa pretendía reducir el tráfico de entrada a la catedral y al castillo de Durham (patrimonio mundial) a través de “Saddler Street”. Inicialmente el sistema consistía en el accionamiento de una pizona hidráulica que restringía el acceso a los vehículos autorizados. El 22 de enero de 2011 se implantó un sistema de lectura de matrículas ANPR<sup>13</sup> “Automatic Number Plate Recognition” o sistema de reconocimiento automático de matrículas.

---

<sup>12</sup> Transpondedor: Un transpondedor o transponder es un tipo de dispositivo utilizado en telecomunicaciones cuyo nombre viene de la fusión de las palabras inglesas Transmitter (Transmisor) y Responder (Contestador/Respondedor). Da una respuesta automática (un mensaje, predeterminado o no) a la recepción de una señal concreta de interrogación.

<sup>13</sup> ANPR: “Automatic number plate recognition”. Es un método de vigilancia en masa que utiliza reconocimiento óptico de caracteres en imágenes para leer las matrículas de los vehículos

- En 2003 se inaugura en **Londres** el “Congestion charging scheme” que afectaba a un ámbito de 22 km<sup>2</sup> en el centro urbano de la ciudad. El sistema imponía tarifas de 5 libras esterlinas (más de 7 €) al día para aquellos vehículos que accedían al centro de la ciudad. Ese mismo año, la ciudad nórdica de **Namsos** implementa un sistema de peaje urbano en cordón similar al de Stavanger.
- En 2005 después de más de dos años de trabajos en la estela del “Congestion charging de Londres”, **Edimburgo** somete a referéndum un sistema de peaje urbano, en una consulta que contó con una participación del 61%, que resultó ser rechazado por casi las tres cuartas partes de los votantes. El sistema consistía en la implantación de dos cordones de peaje (uno interior y otro exterior) en los que se imponía una tasa a aquellos vehículos que viajaran hacia el centro de la ciudad. El cordón externo funcionaría entre las 7:00 a.m. y las 10:00 a.m.; el interior entre las 7:00 a.m. y las 7:00 p.m., de lunes a viernes en ambos casos. La tasa diaria planteada fue de £ 2 (2.40 €). A pesar de los estudios que avalaban sus buenos resultados, el sistema fue rechazado.
- En 2006, tras más de una década de estudios e iniciativas, se prueba en **Estocolmo** un sistema de peaje urbano dirigido a reducir la congestión. El sistema se somete a referéndum el 17 de septiembre del mismo año y se aprueba con un estrecho margen del 51,7 % a su favor.
- En 2007 en **La Valletta (Malta)** se pone en marcha un sistema de control de accesos para limitar el número de vehículos que entran en la ciudad. Con su aplicación se logró reducir el número de vehículos entrantes de 10.000 a 7.900; el sistema también hizo caer un 60% la entrada de vehículos con estancias superiores a 8 horas. Por otro lado, hizo aumentar un 34% la entrada de vehículos con estancias inferiores a 1 hora que visitaban la ciudad.
- En 2008 la propuesta de implantación del peaje urbano de la ciudad de **Nueva York** fue rechazada a pesar de su aprobación por el Consejo de la Ciudad de Nueva York. La ciudad pretendía implantar un peaje urbano similar al de Londres con un ámbito de aplicación localizado en el área del distrito central de negocios de Manhattan (CBD). Este CBD, donde ingresaban cada día más de 800.000 vehículos a motor, contaba con una superficie similar al Congestion Charge de Londres. (Zupan, Fellow, & Perrotta, 2003) concluyeron que el sistema podría generar ingresos sustanciales reduciendo las entradas diarias entre el 5% y el 13%, dependiendo del esquema tarifario elegido, provocando un aumento de la velocidad media de circulación y una disminución de los tiempos de viaje. A pesar de estas buenas previsiones, la medida fue suspendida, aunque sigue siendo una de las pocas opciones sobre la mesa para aliviar los problemas de congestión y mejorar el insuficientemente financiado sistema de transporte público de la ciudad. Es por ello que, últimamente, el Gobernador Andrew Cuomo ha vuelto a impulsar la medida. Otras ciudades americanas como Berkeley, Madison o Honolulu también decidieron abandonar la idea del peaje urbano.

- En enero del 2008 se implementa en **Milán** el programa Ecopass que establece, en la zona central de la ciudad “Cerchia dei Bastioni” de unos 8.2 km<sup>2</sup>, una zona restringida de tráfico o ZTL (zona de tráfico limitado). El objetivo principal del programa era reducir el tráfico y la contaminación del aire. La estructura tarifaria implantada variaba en función de las emisiones PM<sub>10</sub> generadas por los vehículos. Los fondos recaudados se utilizarían para proyectos de mejora del transporte público, construcción de carriles para bicicletas y en ayudas para la adquisición de vehículos ecológicos. La principal diferencia de este sistema con el de Londres o Estocolmo es que el peaje de Milán sólo se aplicaba a los vehículos con motores altamente contaminantes que entraban en la ZTL (zona de tráfico limitado) prohibiéndose la entrada de vehículos con motores antiguos muy contaminantes.
- En 2008 en el **Área Metropolitana de Manchester** en Inglaterra se somete a referéndum la instalación de un cordón interior y exterior de peaje urbano con la idea de generar ingresos para mejorar el transporte público de la ciudad. El resultado del referéndum fue un abrumador rechazo al peaje urbano.
- En 2009 en **Ciudad de México** se inaugura la primera fase de la autopista urbana de peaje “Viaducto Bicentenario” entre los tramos de Antiguo Toreo y Lomas Verdes. El 3 septiembre del 2010 se inaugura la segunda fase de esta autopista desde Lomas Verdes hasta el lago de Guadalupe. Esta autopista urbana cuenta con sistema ERP (Electronic Road Pricing). Los vehículos que circulan por ella deben tener instalados unos dispositivos TAG<sup>14</sup> para pagar por su uso. Por otro lado, en Ciudad de México existe la “Supervía urbana de Poniente”, de 7 km de longitud, que constituye el eje occidental de la autopista urbana de peaje que une las carreteras a Querétaro, Toluca y Cuernavaca. La autopista enlaza Santa Fe con el anillo Periférico Sur a la altura de Luis Cabrera, con tramos variables de cuatro y seis carriles de circulación. En 2013 se culminó la construcción de los últimos tramos de esta autopista urbana.
- En julio de 2010 en **San Francisco (EUA)**, después de varios estudios de la “San Francisco County Transportation Authority (SFCTA)”, se implanta en el puente de San Francisco-Oakland Bay una tasa por congestión para todos aquellos vehículos que cruzan la infraestructura. Los ingresos generados se emplearían en proyectos de mejora de la movilidad de la zona.
- En 2011 se plantea en **Copenhague** implementar un sistema de peaje urbano para reducir la congestión de tráfico y mejorar la calidad del aire de la ciudad. En 2012 se abandona la idea por no llegar a un consenso ciudadano a la hora de elegir los viales por donde se aplicaría el peaje.

---

<sup>14</sup> El “Transponder” o comúnmente conocido como “TAG” es un dispositivo instalado en el vehículo que permite el pago electrónico de un peaje a su paso por los puntos de entrada o salida de una autopista de peaje. El “TAG” se comunica por radiofrecuencia con un receptor, generalmente instalado en un pórtico, ubicado en las garitas de peaje. Ampliamente utilizado en autopistas de peaje, es necesario que el usuario adquiera y coloque el dispositivo transmisor/emisor dentro del vehículo, de modo que no es necesario parar para pagar el peaje ya que el dispositivo identifica al usuario y realiza la transacción automáticamente. De este modo se logra una considerable reducción de colas y tiempos de espera. Las tecnologías utilizadas inicialmente obligaban a reducir la velocidad del vehículo a 20 o 30 Km/h para realizar la transacción, hoy en día, los nuevos sistemas de pago son capaces de realizar la operación sin que el vehículo tenga que reducir su velocidad.

- En 2012 las autoridades de **Medellín (Colombia)** aprueban una ley que permite implementar peajes urbanos similares a los de Londres o Singapur. La ley específica que la medida puede aplicarse en ciudades con más de 300.000 habitantes, cómo Medellín. En marzo del 2014 el Gobierno congela la medida.
- El 1 de enero de 2013 se implanta en la ciudad de **Gotemburgo** (Suecia) una tasa por congestión que tiene cómo modelo el sistema aplicado en la ciudad de Estocolmo. Esta tasa por congestión se aplica a la mayoría de los vehículos que entran y salen del centro de Gotemburgo, aunque también afecta a algunas carreteras principales que cruzan la ciudad. El propósito principal de la tasa era reducir la congestión de tráfico y mejorar las condiciones medioambientales del centro de la ciudad, así cómo obtener financiación para grandes proyectos ferroviarios y de carreteras en los alrededores de la ciudad.
- En 2014 el Gobierno de Bogotá presenta un plan para la instalación de peajes urbanos en **Bogotá**. Dicho plan se encuentra con barreras para su ejecución por la presión popular. En 2017 el alcalde Peñalosa anuncia la intención de aplicar el peaje sólo en la autopista Norte, la calle 13 y vía Villavicencio de Bogotá.
- En 2015 el Gobierno de **Hong-Kong** reabre el debate sobre la implementación de un sistema de peaje urbano para reducir la congestión en el distrito de negocios de la ciudad. Entre el 11 de diciembre de 2015 y el 8 de marzo de 2016 se realizó una consulta pública sobre la medida. En enero de 2017 se publica un informe público con los resultados de la consulta que recomienda un estudio exhaustivo de las implicaciones en el tráfico de su implantación, tecnología a aplicar y análisis de la experiencia internacional en peajes urbanos.

En líneas generales, podríamos decir que existen diez peajes urbanos relevantes en el mundo; uno en Asia (Singapur) y nueve en Europa, de los cuales cuatro corresponden a Noruega (Bergen, Oslo, Kristiansand y Stavanger), dos en Italia (Roma y Milán), dos en Suecia (Estocolmo y Gotemburgo) y uno en Reino Unido (Londres). A pesar de ello, existen otras ciudades en el mundo como Nueva York o Hong King donde se han intentado implementar peajes urbanos, pero por diferentes razones, principalmente políticas, no se han logrado poner en funcionamiento. Incluso en el continente africano la ciudad de Nairobi estudió la medida con el apoyo del Bando Mundial, pero en el año 2008, decide abandonar el proyecto por falta de acuerdo con la empresa que debía encargarse de la financiación y construcción del proyecto. En 2013 el Gobierno de Nairobi vuelve a mostrar interés por el proyecto y decide buscar nuevos concesionarios<sup>15</sup>. Otras ciudades como Beijing o São Paulo estudian la medida.

En España, todavía ninguna ciudad ha decidido implementar peajes urbanos como los de Londres o Estocolmo, a pesar de ello, ciudades como Granada o Huesca han implantad sistemas similares a los

---

<sup>15</sup> Ver informe del Banco Mundial: <http://www.bancomundial.org/projects/P103973/nairobi-urban-toll-road-prg?lang=es>

empleados en Roma o Milán, con el objetivo de restringir la circulación de vehículos privados dentro de sus cascos históricos. En 2013 el Gobierno de España, fruto de la tensión diplomática en torno a Gibraltar, estudió introducir una tasa por congestión con el objetivo de reducir el tráfico en la ciudad gaditana de la línea de la Concepción a los vehículos que circularan por la ciudad con destino Gibraltar.

### **3.3 Objetivos de los peajes urbanos**

Si analizamos los diferentes peajes urbanos en funcionamiento encontramos que, según el país donde se han implementado, la medida perseguía diferentes objetivos. Por ejemplo, en el caso de los peajes urbanos de Singapur, Londres o Estocolmo su objetivo principal fue la reducción del tráfico de automóviles en sus centros urbanos, aunque con matices. Mientras en Singapur la medida pretendía evitar la congestión y mejorar la fluidez circulatoria, en Estocolmo se esperaba que el peaje mejorara la calidad ambiental en la ciudad. Por su parte, el “Congestion charging” de Londres con un planteamiento más próximo al peaje urbano de Singapur, planteaba como objetivo explícito la mejora de la fiabilidad de la red urbana de transporte y del sistema de transporte público en autobús. Sin embargo, los peajes urbanos nórdicos de Oslo o Bergen tuvieron como fundamento y objetivo la generación de recursos económicos para la construcción de nuevas infraestructuras de transporte (Pozueta Echavarri, 2008).

En el caso de los peajes noruegos, los objetivos se pueden matizar encontrando cierta evolución con el paso de los años. El primer peaje urbano nórdico fue el de Bergen en 1986, que se planteó abiertamente con el objetivo de obtener recursos para la construcción de una red de carreteras, cuyo desarrollo sin los peajes se hubiera prolongado mucho más en el tiempo. Finalizado el período de 15 años previsto de vigencia, el sistema se prorrogó para cubrir nuevos proyectos de carreteras y de transporte público, concretamente la construcción de una línea de tranvía que iba a consumir la mitad de los recursos generados por el peaje.

En el diseño del “Toll Ring” de Oslo sólo cuatro quintas partes de los beneficios obtenidos se dirigirían, al igual que en el peaje urbano de Bergen, a financiar proyectos de carreteras y, en particular, túneles. El resto se destinaba explícitamente a la mejora del transporte público.

En el peaje urbano de Trondheim, los objetivos se diversificaron y se ampliaron sobre los de Oslo, incluyendo la mejora del viario urbano para peatones y ciclistas, mientras que el resto de los proyectos noruegos, mezclaban el objetivo de financiar la construcción de carreteras y el de mejorar el transporte público.

A continuación, se adjunta un resumen donde podemos ver los objetivos perseguidos por los principales peajes urbanos:

- a) Peajes urbanos con el objetivo de reducir la congestión circulatoria
  - Singapur (1975): Reducir la congestión circulatoria.

- Roma (1989): Reducir el tráfico en el centro para impedir su deterioro.
  - Durham (2002): Reducir el tráfico en la calle de la Catedral.
  - Londres (2003): Reducir la congestión.
    - Mejorar el transporte público en autobús
    - Mejorar la fiabilidad para los usuarios de automóviles
    - Hacer más eficiente la distribución de mercancías y servicios
  - Estocolmo (2006): Reducir la congestión.
    - Mejorar la accesibilidad
    - Mejorar el medio ambiente
  - Milán (2008): Reducir el tráfico y la contaminación del aire.
  - Gotemburgo (2013): Reducir la congestión y la contaminación del aire.
- b) Peajes urbanos con el objetivo de generar recursos para la construcción de carreteras
- Bergen (1986): Obtener fondos para completar la red de carreteras, por un periodo de 15 años.
  - Oslo (1990): Financiar la construcción de 50 proyectos de infraestructura viaria (80% de los beneficios) y de transporte público (20%), por un período de 16 años.
  - Trondheim (1991): Financiar la construcción de un cinturón viario en torno al centro.
    - Mejorar el viario interno para peatones y ciclistas.
    - Dar prioridad al transporte público.
  - Kristiansand (1997): Inicialmente recaudar fondos para financiar proyectos de infraestructuras de transporte.
  - Stavanger (2001): Financiar un paquete de inversiones en proyectos de infraestructuras varias y seguridad del tráfico.
  - Tønsberg (2004): Reducir la contaminación del aire originada por las emisiones de los vehículos automotores y utilizar los fondos recaudados para financiar proyectos de mejora del transporte público.
  - Namsos (2003): Reducir la contaminación del aire originada por las emisiones de los vehículos automotores y utilizar los fondos recaudados para financiar proyectos de mejora del transporte público.
  - Haugesund (2008): Reducir la contaminación del aire originada por las emisiones de los vehículos automotores y utilizar los fondos recaudados para financiar proyectos de mejora del transporte público.

En definitiva, podría concluirse que los objetivos de los peajes urbanos se articulan en torno a dos metas principales, la reducción de la congestión circulatoria y la financiación de nuevas infraestructuras viarias, matizados con metas de calidad ambiental y mejora de los modos de transporte alternativos al vehículo privado, en particular, el transporte público.

### 3.4 Ámbitos de aplicación de los peajes urbanos

Por lo general, los peajes urbanos se suelen aplicar en las áreas centrales de las ciudades, ya que es la zona que presenta mayores problemas de congestión. Estas áreas se delimitan con un cordón o anillo, en cuya entrada se hace efectivo un sistema de control para el cobro de la tasa o peaje. Nos encontramos diferentes esquemas tarifarios desde los que aplican un cargo por cada entrada y/o salida a través del cordón, es el caso más común de los peajes nórdicos, hasta los que aplican una tarifa fija, normalmente diaria, por circular dentro del área delimitada por el cordón como es el caso de Londres. También existen algunos casos donde se tarifican vías principales de la ciudad, es el caso de Liverpool y su peaje en el “Silver Jubilee Bridge” y en “Mersey Gateway”.

En cuanto al tamaño del área afectada por el peaje, la superficie suele ser muy variable y depende mucho de la configuración urbana y, en particular, de la geografía; resulta particularmente complejo establecer cordones razonables en zonas con amplias superficies de agua, como en el caso de Estocolmo, Bergen y, en menor medida, Oslo. En ciudades como Estocolmo, compuestas por varias islas separadas por amplios cursos de agua y lagos, la superficie cerrada por el anillo llega a alcanzar una cifra cercana a los 50 km<sup>2</sup>, más del doble de la de Londres que, en su momento, fue considerada de gran tamaño con sus 22 km<sup>2</sup>.

El área afectada por el peaje urbano de Singapur y Roma<sup>16</sup> presentan superficies más moderadas de 7.2 y 8.8 km<sup>2</sup>, respectivamente, que llegan a incluir buena parte del centro financiero, en el primer caso, y del centro histórico, en el segundo.

### 3.5 Tarifas urbanas de peaje

A la hora de diseñar correctamente un peaje urbano la elección de la tarifa óptima es clave para poder alcanzar los objetivos perseguidos, ya que influirá decisivamente en los efectos sobre el tráfico y sobre otras variables relacionadas con él. Estas tarifas urbanas de peaje, en general, suelen aplicarse mediante tres tipos de esquemas tarifarios:

- Esquema tipo área: consiste en aplicar una tarifa de peaje que da derecho al acceso y circulación de los vehículos dentro de un área urbana determinada durante un período de tiempo fijo, normalmente un día. Un ejemplo de esta tipología de peaje es el peaje urbano de Londres.
- Esquema tipo cordón: consiste en aplicar una tarifa a todos aquellos vehículos que entran o salen de la ciudad a través del cordón o anillo que delimita el área afectada por el peaje. La mayoría de los peajes urbanos nórdicos responderían a este esquema.

---

<sup>16</sup> En realidad, en Roma existen tres recintos de peaje independientes, la Zona de Tráfico Limitado (ZTL) del centro histórico, con unos 5,5 Km<sup>2</sup> de extensión y establecida en 1989, la ZTL de San Lorenzo, establecida en 2003, con 2,5 Km<sup>2</sup> de superficie aproximada, y la ZTL del Trastevere, establecida en mayo de 2004, con 0,8 Km<sup>2</sup>.

- Esquema tipo vía: consiste en aplicar una tarifa de peaje a todos aquellos vehículos que circulan por una determinada vía urbana. Uno de los casos más representativos de este esquema sería la ciudad de Liverpool que aplica un peaje por el uso del túnel de Mersey o el puente de Silver Jubilee.

Una de las principales ventajas de aplicar tarifas diarias fijas es su claridad y, con ella, la facilidad para divulgarlas y explicarlas. En cambio, las tarifas por entrada suelen ser más equitativas buscando aproximarse más al pago por uso de la infraestructura viaria. También se pueden aplicar tarifas variables a lo largo del periodo de funcionamiento del peaje o incluso en función de la demanda y los niveles de fluidez de tráfico que se pretendan conseguir. Otra opción tarifaria consiste en aplicar diferentes tarifas en función de la tipología del vehículo (tamaño, calidad ambiental, servicio público, etc.) esta opción puede ayudar a mejorar el resultado de la implantación del peaje urbano.

Desde el punto de vista del precio de la tarifa, los peajes urbanos que pretenden reducir la afluencia de vehículos para disminuir la congestión suelen aplicar tarifas que, en general, suelen ser relativamente altas; por el contrario, los peajes dirigidos a recaudar fondos habitualmente suelen aplicar tarifas más reducidas para mantener una mayor afluencia de vehículos y tratar de maximizar la recaudación.

A continuación, se presenta un cuadro resumen con las tarifas aplicadas en algunos de los principales peajes urbanos:

PAÍS	CIUDAD	TIPO DE PEAJE	ESQUEMA	TARIFA
Italia	<u>Milán</u>	Tasa por congestión / Zona de bajas emisiones	Área	Tarifa general de 5€/día. Residentes 2€/día. Vehículos de servicio 3€/día. Autocares entre 15€ y 40€ día.
Italia	<u>Palermo</u>	Zona de tráfico limitado	Área	Pase solo disponible para vehículos poco contaminantes (híbridos, euro 3 y euro 4). Tarifas de 5€/día y 50-600€ año
Letonia	<u>Jurmala</u>	Tasa por congestión	Área	Tarifa de 2€/día para todos los vehículos.
Malta	<u>Valletta</u>	Tasa por congestión	Área	Acceso libre hasta los primeros 30 minutos. Entre 30-60 min 0,82 €. Más de 60 minutos 0,82€/h hasta un máximo de 6,52 €.
Noruega	<u>Bergen</u>	Tasa por congestión / Zona de bajas emisiones	Cordón	Por paso diario. Entre 2 y 10 €/día según tipo de vehículo (ligero o pesado) y horario (pico o valle)
Noruega	<u>Haugesund</u>	Tasa por congestión	Cordón	Por paso diario. 1,52€ €/día vehículos ligeros (<3,5 Tn) y 3 €/día vehículos pesados.
Noruega	<u>Kristiansand</u>	Tasa por congestión	Cordón	Por paso diario. Entre 1,52 y 4,57 €/día según tipo de vehículo (ligero o pesado) y horario (pico o valle).
Noruega	<u>Namsos</u>	Tasa por congestión	Cordón	Por paso diario. 2-4 €/día según tipo de vehículo (ligero o pesado) y horario (pico o valle)
Noruega	<u>Oslo</u>	Tasa por congestión / Zona de bajas emisiones	Cordón	Por paso diario. Entre 1,5 y 10,5 €/día según tipo de vehículo (ligero o pesado)
Noruega	<u>Stavanger</u>	Tasa por congestión	Cordón	Por paso diario. Entre 2,2 y 5,5 €/día según tipo de vehículo (ligero o pesado)
Noruega	<u>Tonsberg</u>	Tasa por congestión	Cordón	Por paso diario. 1,6 € €/día vehículos ligeros (<3,5 Tn) y 3,3 €/día vehículos pesados.
Noruega	<u>Trondheim</u>	Tasa por congestión	Cordón	Por paso diario. Entre 0,9 y 4 €/día dependiendo de la estación de paso.
Reino Unido	<u>Durham</u>	Tasa por congestión	Área	Tarifa de 2€ /día para todos los vehículos.
Reino Unido	<u>London</u>	Tasa por congestión / Zona de bajas emisiones	Cordón	Congestion Charge: dependiendo del método de pago entre 12€-16€ por día. Emission Surcharge: 101 € adicionales.

PAÍS	CIUDAD	TIPO DE PEAJE	ESQUEMA	TARIFA
Reino Unido	<u>Liverpool</u>	Tasa por congestión	Vía tarificada	Dependiendo del tipo de vehículos entre 2 y 8 libras por uso. Posibilidad de abonos mensuales. Motocicletas libres de cargo.
Reino Unido	<u>Dartford</u>	Tasa por congestión	Vía tarificada	Dependiendo del tipo de vehículos entre 2,7 y 6,7 euros por uso. Posibilidad de abonos mensuales. Motocicletas libres de cargo.
República de Singapur	<u>Singapour</u>	Tasa por congestión	Área	Tarifa alrededor de 1,5€ por entrada variable en función del tipo de vehículo y la hora de entrada.
Suecia	<u>Göteborg</u> ( <u>Gothenburg</u> )	Tasa por congestión / Zona de bajas emisiones	Cordón	Tarifa variable a lo largo del día entre 1 y 2,2€ al día. Tarifa máxima de 6,2€/día
Suecia	<u>Stockholm</u>	Tasa por congestión / Zona de bajas emisiones	Cordón	Por paso diario. Entre 1,15 y 3,6 €/día para todos los vehículos con un máximo de 11 €/día.

**Tabla 2. Tarifas de los peajes urbanos. Fuente: Elaboración propia.**

Si observamos la Tabla 2 veremos que existe una gran diferencia entre las tarifas urbanas de peaje aplicadas en Londres y las del resto de ciudades. Mientras que en Londres acceder en vehículo privado a su área central puede llegar a tener un coste diario de 16 €, en el resto de las ciudades el coste se mueve entre 1 y 5 euros al día. Este hecho refleja el especial interés de la ciudad de Londres en reducir la congestión.

En cuanto a las experiencias tarifarias que aplican cargos ligados al número de entradas/salidas realizadas por el vehículo, con carácter general, suelen establecer un importe máximo diario de pago, independiente al número de entradas/salidas realizadas. También encontramos que la tarifa puede variar según el día (laborable, sábado y festivo), la hora y el punto de acceso.

A la vista de las ciudades que han implantado peajes urbanos vemos que la medida suele ir ligada a una política de descuentos y excepciones, además de aplicar sanciones en aquellos conductores que han infringido alguna norma. Existen casos donde los usuarios del peaje urbano pueden disponer de abonos mensuales que comportan importantes descuentos. Aunque las políticas de excepciones que encontramos suelen tener criterios variados, por lo general, suelen coincidir en dejar exentos del pago de la tarifa a los vehículos de emergencia, transporte público, vehículos eléctricos, así como a los vehículos de discapacitados, de la policía y del ejército. En algunas ciudades como Londres o Estocolmo los taxis también han conseguido estar exentos del pago de la tasa. En cuanto a los descuentos para los residentes encontramos casos, como el caso de Londres, donde los residentes cuentan con un descuento del 90% sobre la tarifa normal. Sin embargo, ciudades como Singapur o Estocolmo carecen de descuentos para residentes.

En lo que se refiere a los vehículos pesados, en líneas generales, encontramos que suelen tener tarifas superiores a la correspondiente a turismos. En cuanto a las motocicletas en la mayoría de los casos suelen estar exentas del pago de la tarifa o disponer de grandes descuentos.

A continuación, se presenta un cuadro resumen con las políticas de exenciones y descuentos encontradas en los principales peajes urbanos:

CIUDAD	EXENCIONES	DESCUENTOS	SANCIONES
<u>Bergen</u>	Vehículos eléctricos	Por pago adelantado online.	33 €
<u>Durham</u>	Residentes dentro de la zona (hasta 5 vehículos). Organizaciones y empresas públicas dentro de la zona. Minusválidos. Motocicletas, vehículos de reparto, vehículos emergencia, policía, vehículo librado en el condado de Durham.	No	50 €
<u>Göteborg (Gotemburgo)</u>	Vehículos extranjeros. Minusválidos. Motocicletas, vehículos de reparto, vehículos emergencia, policía.	Vehículos poco contaminantes. Si un vehículo pasa varias veces en menos de 60 minutos sólo paga una vez.	52 €
<u>Haugesund</u>	Vehículos eléctricos.	Por pago adelantado online.	33 €
<u>Kristiansand</u>	Vehículos eléctricos.	Por pago adelantado online.	33 €
<u>London</u>	“Congestion Charge”: vehículos con 9 o más asientos, motocicletas, minusválidos, vehículos de ultra baja emisión que cumplan con la norma Euro 5 de contaminación del aire. “Emissions Surcharge”: vehículos que cumplan con la norma Euro 4 y triciclos y cuatriciclos que cumplan con la Euro 3.	Por pago adelantado. Descuentos a Residentes (90%), minusválidos (100%), vehículos de 9 o más asientos, triciclos (100%), eléctricos (100%), híbridos.	165 €
<u>Milano Area C: Low Emission Zone &amp; Charging Scheme</u>	Vehículos híbridos y eléctricos.	Residentes y vehículos de servicio.	70-285€
<u>Namsos</u>	Vehículos eléctricos.	Por pago adelantado online.	33 €
<u>Oslo</u>	Vehículos eléctricos.	Por pago adelantado online.	33 €
<u>Palermo</u>	Vehículos eléctricos, motocicletas, cuerpos de seguridad, transporte público.	Vehículos híbridos.	41-164€
<u>Stavanger</u>	Vehículos eléctricos.	Por pago adelantado online.	33 €
<u>Stockholm</u>	Vehículos extranjeros. Minusválidos. Motocicletas, vehículos de reparto, vehículos emergencia, policía.	Vehículos poco contaminantes. Si un vehículo pasa varias veces en menos de 60 minutos sólo paga una vez.	52 €
<u>Tonsberg</u>	Vehículos eléctricos.	Por pago adelantado online.	33 €
<u>Trondheim</u>	Vehículos eléctricos.	Por pago adelantado online.	33 €
<u>Valletta</u>	Residentes dentro de la zona. Minusválidos. Motocicletas. Vehículos emergencia y policía. Transporte público.	Por pago adelantado online 10% descuento.	Pago de la factura después de 30 días de ser enviada se aplica recargo de 2% sobre el importe de la factura. Pago a más de 90 días del envío de la factura se recarga con un 100% del importe facturado.
<u>Singapur</u>	Vehículos de emergencia y policía.	Taxis, motocicletas, transporte colectivo.	Si se pasa por peaje sin el dispositivo TAG se deberá pagar el cargo del viaje más un recargo de 10€.

Tabla 3. Política de exenciones, descuentos y sanciones en los diferentes peajes urbanos. Fuente. Elaboración propia.

### 3.6 Puntos de control en los peajes urbanos

Los puntos de control son ubicaciones donde se instalan equipos de vigilancia como cámaras de lectura de matrículas y, en algunos casos, permiten que el usuario del vial pueda realizar el pago del peaje. El número

de puntos de control varía notablemente en función de la morfología y la disposición de la red viaria de cada ciudad, pero salvo en el caso de Londres, no suelen superar los 30 puntos de acceso.

En Londres, la disposición de controles se complica pues, además de los dispuestos en los puntos de acceso al ámbito de “congestion charging”, se han dispuesto numerosos controles con cámaras en el interior del recinto, con objeto de identificar los movimientos interiores de vehículos, igualmente sujetos a la tarifa.

SUPERFICIE DEL ÁMBITO DE PEAJE Y PUNTOS DE CONTROL DE ACCESO		
	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Puntos de control (n°)
Singapur	7.2	28 (+14)
Bergen	35	7 + 1
Roma	8.8 (CF)	22 (CH)
Oslo	31	19
Trondheim	18	23
Londres	22	230
Estocolmo	50	18

CF = centro financiero / CH = centro histórico

Tabla 4. Superficie del ámbito del peaje y puntos de control de accesos. Fuente: (Pozueta Echavarri, 2008).

### 3.7 Tecnología de cobro de los peajes

Durante los últimos años, la tecnología aplicada a los sistemas de cobro de peaje ha presentado una notable evolución. Esto implica que en la mayoría de los casos la liquidación del peaje se realiza electrónicamente con transacciones cada vez más rápidas que permiten realizar el pago sin necesidad de que el vehículo tenga que reducir la velocidad o detenerse al paso por la estación de peaje. Los sistemas de cobro los podemos dividir en:

Sistemas no electrónicos: es el sistema de cobro más elemental. El pago se realiza en la caseta de peaje de manera manual con dinero en metálico. Este sistema se utilizaba habitualmente en las autopistas. El principal inconveniente es que el conductor debe detener su vehículo y poseer el dinero en efectivo para realizar el pago correspondiente al personal allí ubicado. La capacidad de cobro es muy limitada (350 veh/carril/hora por operario y 400 veh/carril/hora por máquina de moneda) y perjudica la circulación normal del tráfico ocasionando congestión y demoras en el viaje.

Sistemas electrónicos: una de las modalidades más elementales de este sistema es utilizar las instalaciones de pago no electrónico, añadiendo equipamiento que permita el pago mediante tarjetas de débito y crédito. Estos sistemas siguen ocasionando congestión puesto que para poder pasar la tarjeta bancaria el vehículo debe detenerse. Para dar solución a este problema, a principios de los años noventa, los concesionarios de autopistas introdujeron *los sistemas de peaje electrónico sin detención* (conocidos como telepeaje, peaje dinámico o ETC-*Electronic Toll Collection*) que lograban reducir el tiempo de paso en las áreas de peaje aumentando su capacidad.

Aunque los sistemas de peaje electrónico sin detención mejoraban la capacidad de paso de vehículos con respecto a los sistemas no electrónicos, presentaban el inconveniente de que para realizar la transacción bancaria el vehículo debía reducir su velocidad al pasar por la caseta de peaje. Los actuales *sistemas de cobro de peaje con tecnología “free flow”* permiten realizar el pago electrónico prácticamente sin disminuir la velocidad. Para su funcionamiento es necesario prever una dotación técnica en cuanto a medios, y garantizar una integridad legal que asegure el cobro de los peajes con las mayores garantías, confiriendo al sistema de un marco regulatorio adaptado y dispuesto para su consecución final.<sup>17</sup>

Debido a que se crean diferentes tipos de sistemas de cobro incompatibles entre sí, organizaciones internacionales como ISO (*International Organization for Standardization*), IEC (*International Electrotechnical Commission*) y en Europa la CEN (*Comité Européen de Normalisation*) abogan por la estandarización de sistemas en el mundo que sean compatibles desde el punto de vista de los usuarios, operadores y productores. Por su parte, la Unión Europea tomó medidas en el año 2004 y el Parlamento Europeo aprobó la Directiva 2004/52/CE de 29 de abril, traspuesta en el año 2006 en España como Real Decreto 94/2006, de 3 de febrero, sobre interoperabilidad de los sistemas de telepeaje en las carreteras de la Unión Europea. Para alcanzar ese objetivo se prevé la creación de un servicio europeo de Telepeaje (EETS), complementario a los servicios nacionales de telepeaje de los Estados miembros. Dicho servicio afecta únicamente al método de percepción de los peajes o cánones.

Posteriormente hay que referirse a la **Directiva 2009/750/CE**, de 6 de octubre, sobre definición del EETS y sus elementos técnicos. En dicha decisión, la Comisión recuerda que la tecnología del peaje debe permitir la recaudación del peaje sin barreras físicas, lo que redundará en beneficio de la seguridad vial y de la disminución de la congestión.

### 3.7.1 Peajes en flujo libre “free flow”

Los sistemas de peaje tipo “free-flow” son un tipo de peaje electrónico que permite cobrar a los usuarios de una vía sin obligarles a parar ni a reducir su velocidad y que posibilitan dos opciones para su aplicación:

- *Sistemas “free flow” montados en pórticos*: la solución “free flow” montada en pórtico aprovecha como infraestructura telemática el transpondedor (OBU) y los receptores-antena incluidos en el complejo sistema de equipos electrónicos dispuestos sobre pórticos encumbrados a lo largo de la traza del vial, permitiendo la identificación e individualización de cada vehículo (Ruiz, 2005).
- *Sistemas “free flow” mediante “videotolling” o videodetección*: el “videotolling” por su parte está basado en la lectura de matrículas mediante cámaras y su posterior reconocimiento gracias a un software especializado. Para ellos se utiliza tecnología ANPR (Automated Number Plate Recognition) basada en fotografía digital y algoritmos de reconocimiento óptico de caracteres

---

<sup>17</sup> Implantación de nuevos sistemas electrónicos de cobro de peaje en España. (Saldeña Algred, Pedro; Vasallo Magro, José M. (2012))

OCR<sup>18</sup> para identificar a los vehículos que pasan por un lugar en particular. Los sistemas pueden escanear las matrículas de los vehículos que pasen por el peaje a velocidades de hasta 200 km/h con una frecuencia aproximada de una por segundo. Esta tecnología puede ser aplicada en peajes urbanos.

En el caso de la video detección los algoritmos utilizados para el reconocimiento de matrícula siguen las siguientes fases durante el proceso de identificación de la matrícula:

- a) Localización de la matrícula: el software se encarga de encontrar y aislar la matrícula del vehículo en una imagen.
- b) Orientación y tamaño de la matrícula: la imagen captada con la matrícula se ajusta a las dimensiones y tamaño requerido.
- c) Normalización: se ajusta el brillo y el contraste de la imagen capturada.
- d) Segmentación de los caracteres: se identifican los distintos caracteres presentes en la matrícula.
- f) Reconocimiento óptico de caracteres: los caracteres identificados se reconocen como texto.
- g) Análisis sintáctico y geométrico: se comprueban los caracteres reconocidos con las reglas específicas del país al que pertenece la matrícula.



Figura 1. Proceso de reconocimiento matrículas con OCR.

### 3.7.2 Problemática y obstáculos de cobro en los peajes “free flow”

En España, a la hora de implementar los sistemas electrónicos de cobro basados en tecnología “free flow” nos encontramos con el obstáculo de la falta de una regulación normativa y legal, que garantice el cobro de la tarifa de peaje. Para garantizar el pago de la tarifa en un peaje con un sistema en flujo libre todos sus usuarios deberían tener instalado en sus vehículos unos transpondedores para realizar el pago automático. De la experiencia internacional se deriva que con el peaje tradicional se garantiza un 100% del cobro mientras que con los sistemas “free flow” se garantizaría únicamente un 95% de la recaudación teórica,

---

<sup>18</sup> OCR (del inglés Optical Character Recognition), es un proceso dirigido a la digitalización de textos, los cuales identifican automáticamente a partir de una imagen símbolos o caracteres que pertenecen a un determinado alfabeto, para luego almacenarlos en forma de datos. Así podremos interactuar con estos mediante un programa de edición de texto o similar.

aunque ello depende del país y del marco legal que haya desarrollado. En este sentido, por ejemplo, en países como España donde debido al turismo existen muchos vehículos extranjeros o vehículos de paso por los desplazamientos masivos hacia el Norte de África durante las vacaciones, sería muy difícil garantizar la totalidad del cobro de la tarifa de peaje con estos sistemas sino se desarrolla un marco legal que garantice su cobro. Este hecho puede ser uno de los motivos por los que en España no se haya extendido tanto como en otros países esta tecnología.

### **3.7.3 Nuevas tecnologías de peaje electrónico**

Durante los últimos años debió al avance tecnológico se han considerado diferentes tecnologías para tratar de aplicarlas en los peajes. A continuación, citamos alguna de ellas:

#### *a) Sistema de peaje mediante odómetro*

En 2005, el Departamento de Transportes de Oregón llevo a cabo una prueba piloto donde planteó un sistema de peaje basado en el número de millas recorridas por los vehículos (Persad, Walton, & Hussain, 2007). El proyecto pretendía analizar la viabilidad técnica y económica de implementar en las carreteras de Oregón una tarifa basada en la distancia recorrida. Para llevar a cabo este proyecto era necesario la instalación en los vehículos de un sistema de conteo de abordo (odómetro) que permitiera el seguimiento del número de millas recorridas.



**Figura 2. Equipo de conteo (odómetro) del proyecto piloto de Oregón. Fuente: (Persad et al., 2007).**

En la primavera del año 2006, 280 voluntarios equiparon sus vehículos con un equipo de conteo de millas. Durante un año estos voluntarios pagaron una tarifa de 1,2 centavos de dólar por milla recorrida, a cambio estaban exentos del pago del impuesto de la gasolina. Los participantes debían repostar en una serie de estaciones de servicios que contaban con unidades lectoras que permitían el contaje de las millas y la deducción del impuesto de la gasolina.

#### *b) Sistema de peaje mediante telefonía móvil*

Dada la cobertura casi total de las actuales redes de telefonía 3G/4G, este tipo de tecnología tiene un enorme potencial para ser aplicada en sistemas de peajes por distancia recorrida. El sistema consistiría básicamente en la instalación en el automóvil de un chip con comunicación continua 3G/4G. Gracias a estas

comunicaciones y el despliegue de sistemas GPS en telefonía móvil, se podría determinar la distancia recorrida por el vehículo pudiendo incluso efectuar el pago del peaje.

Este tipo de tecnología ha sido implementado por algunas empresas automovilísticas, es el caso del sistema “On Star” de General Motors. El servicio “On Star” permite a sus usuarios ponerse en contacto con los centros de llamadas de “On Star” durante una emergencia. En caso de que los sensores del vehículo detectasen una colisión, el vehículo envía automáticamente información sobre su estado y posición.

*c) Sistemas de peaje basados en tecnología GPS.*

Es una de las soluciones futuras más prometedoras. El peaje por satélite utiliza una combinación de sistema por satélite y comunicaciones móviles. Para determinar la posición exacta del vehículo se utiliza un sistema de rastreo basado en satélites, mientras que para calcular y efectuar el pago de la tarifa de peaje se utiliza la tecnología de comunicaciones móviles. Para aplicar este sistema, todos los vehículos necesitan de una unidad de abordo que registra los movimientos del vehículo mediante la descarga periódica de sus coordenadas con marca de tiempo desde el satélite. El peaje por satélite se considera una de las tecnologías más favorable para la aplicación de peajes electrónicos porque permite un peaje exacto basado en la distancia. Algunas de sus ventajas serían las siguientes:

- Implican menores costes de transacción que otro tipo de sistemas de peaje. A través de una conexión inalámbrica el conductor dispondría de toda la información de su viaje y con una cuenta de prepago se podría deducir automáticamente el coste del peaje.
- Posibilidad de que el conductor disponga de otros servicios auxiliares en tiempo real como el clima e información del tráfico, así como su posición en caso de emergencia.
- Los costes de operación son bajos debido a que no es necesario invertir en costosas instalaciones de control en carretera tales como cámaras, espiras, etc.
- Presentan mayor facilidad para aplicar tarifas de peajes variable según trayectos, horarios y duración del desplazamiento.
- Actualmente el usuario debería comparar una unidad embarcada GPS, pero en un futuro es posible que todos los vehículos dispongan de este dispositivo de serie.

## **4. LAS EXPERIENCIAS INTERNACIONALES MÁS RELEVANTES EN PEAJE URBANO**

### **4.1 Introducción**

En este capítulo analizaremos con mayor detalle algunos de los peajes urbanos más relevantes puestos en funcionamiento como son los de las ciudades de Singapur, Londres, Estocolmo y Gotemburgo. En todas estas ciudades, en líneas generales, el peaje urbano se ha utilizado como un mecanismo para disminuir el acceso de los vehículos privados a los centros urbanos, imponiendo una tarifa a todo aquel vehículo que pretendía acceder a las zonas más congestionadas y/o contaminadas de la ciudad, de esta forma se trataba de compensar las externalidades negativas generadas por estos vehículos. Esta medida induce a un uso más eficiente de las infraestructuras de transporte existentes, al tiempo que generan ingresos adicionales para la ciudad (Flores-fillol, 2018).

A pesar de las bondades que implican sobre la congestión del tráfico la aplicación de peajes urbanos en ciudades, es difícil implementar un sistema de peaje óptimo dado que algunas de las decisiones más determinantes como la delimitación de la zona restringida, la cuantía de la tarifa o la elección de los vehículos que quedarían exentos de la tasa suelen basarse más en criterios políticos que en criterios técnicos o de eficiencia (Flores-fillol, 2018). Dicho esto, la evidencia empírica sugiere que, en general, la aplicación de tarifas urbanas de peaje es una política eficaz en la medida que suele venir asociada a una fuerte reducción del tráfico viario en las zonas donde se aplica y, en consecuencia, a una disminución de la congestión y de la emisión de contaminantes. Por otro lado, el efecto parece ser especialmente significativo justo después de su implementación con un apoyo público y político en aumento.

En contraste, los detractores de estas políticas urbanas indican que las tasas por congestión generan políticas regresivas, aunque los efectos de los peajes en términos de equidad dependen de las pautas específicas de viaje que se hagan en cada ciudad y del uso que se haga de los ingresos generados por el peaje. (Eliasson, 2006) encuentra que el sistema de peaje urbano de Estocolmo es progresivo en la medida que los conductores de mayor nivel de renta, que suelen ser usuarios de vehículos privados, viajan con mayor frecuencia a la zona restringida por el peaje; mientras que los ingresos generados por el peaje se destinan, en gran parte, a mejorar el transporte público de la ciudad beneficiándose los individuos de menor nivel de renta.

Pese a las ventajas que los peajes urbanos implican a nivel de reducción congestión y contaminación no han sido muchas ciudades la que han implementado la medida, principalmente, por falta de apoyo social y político.

## **4.2 El caso de Singapur. Hacia el transporte sostenible**

La ciudad de Singapur lleva años aplicando políticas orientadas a un desarrollo urbano más sostenible para mejorar el medio ambiente y, por consiguiente, la calidad de vida de sus habitantes. En esta línea ha implementado políticas de movilidad sustentadas en tres pilares básicos: desalentar la movilidad del vehículo privado, promover el transporte público y la movilidad compartida e integrar los usos del suelo en la planificación del transporte. A partir del estudio de (Diao, 2018) analizaremos los instrumentos políticos llevados a cabo por la ciudad-estado de Singapur que han contribuido a una mayor sostenibilidad urbana donde el peaje urbano ha jugado un papel fundamental a la hora de frenar el uso creciente del vehículo privado y ha ayudado a controlar los niveles de congestión en la ciudad.

### **4.2.1 Políticas encaminadas a reducir la dependencia del vehículo privado**

Hace décadas que el Gobierno de Singapur comenzó a implementar una serie de políticas encaminadas a restringir el uso del vehículo privado en el centro de la ciudad de Singapur. En 1975 entró en operación su primer sistema de peaje urbano denominado ALS<sup>19</sup>, de esta forma, Singapur se convirtió en la primera ciudad en implementar el primer sistema de peaje urbano en el mundo. La explotación inicial de este sistema fue sencilla. Se obligaba a los usuarios de vehículos privados, que deseaban acceder a la zona restringida por el peaje, a comprar una licencia de papel que debían llevar siempre visible en el vehículo. La verificación de la licencia se realizaba por la policía de manera visual en cada punto de entrada al peaje. La restricción para circular en el área central de la ciudad se daba de lunes a sábado de 8.30 am a 9.30 am, durante esta franja horaria los vehículos que accedían a la zona afectada por el peaje debían pagar 3\$ al día o solicitar un abono mensual que tenía un coste mensual de 60\$. El sistema ALS de Singapur se puede considerar como una primera versión de los posteriores peajes urbanos implementados en Londres o Estocolmo.

En 1998, el sistema ALS se reemplazó por un avanzado sistema electrónico de peaje denominado ERP (Electronic Road Pricing). Este nuevo sistema, que supuso un considerable avance tecnológico respecto al anterior, se explotaba mediante la instalación de una serie de cámaras instaladas en una serie de pórticos ubicados estratégicamente en las vías rápidas y arterias principales de acceso al centro de la ciudad. Estas cámaras eran capaces de leer las matrículas de los vehículos que circulaban a su paso. El sistema ERP identificaba las matrículas de los vehículos al paso por los pórticos y aplicaba un cargo a través del dispositivo TAG, previamente instalado en los vehículos. A diferencia del sistema de peaje ALS, el nuevo sistema ERP se basaba en el principio de pago por uso. Las tarifas aplicadas con el sistema ERP podían variar según la hora, zona de paso y tipo de automóvil dentro de un rango de tarifas comprendido entre 0.5 y 6 dólares. Durante las horas pico, las tarifas varían cada media hora en función del volumen de tráfico. Existen otras variables que el sistema puede tener en cuenta a la hora de aplicar el cargo como la ocupación

---

<sup>19</sup> ALS es la abreviatura en inglés de "Area Licensing Scheme" implementada por primera vez el 2 de junio de 1975 donde los vehículos privados que accedían al área en horario 7.30 am-9.30 am debían pagar una tasa de 3\$ diarios o 60\$ al mes.

del vehículo, a mayor ocupación mayores descuentos. La versatilidad del sistema ERP permite que las tarifas del peaje urbano de Singapur se puedan ajustar cada tres meses en función de las condiciones de tráfico. A medida que aumenta la velocidad de circulación la tarifa se reduce y viceversa. Este esquema de tarifas dinámicas de congestión permite una gestión de la demanda más inteligente, efectiva y más justa que una tarifa estática.

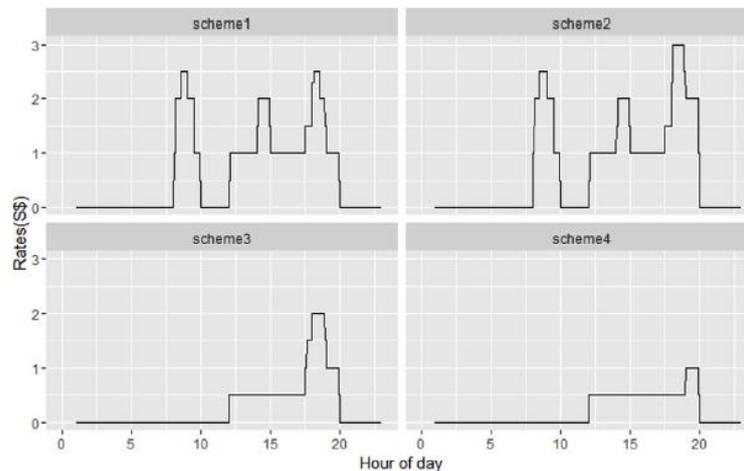


Figura 3. Ratio de tarifas a lo largo del día en los cuatro esquemas de precios. Fuente: (Diao, 2018).

En 2015, el peaje urbano de Singapur contaba con 77 pórticos para el control de los vehículos en la ciudad. En la siguiente figura se muestra la ubicación de estos pórticos. Los diferentes colores representan diferentes tarifas que generalmente aumentan en las horas pico de la mañana y tarde.

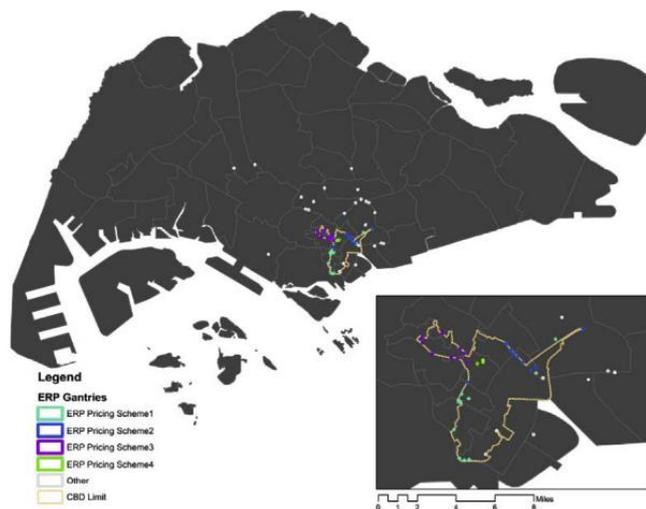


Figura 4. Distribución de los pórticos de entrada al peaje urbano de Singapur. Fuente: (Diao, 2018).

El peaje urbano no ha sido la única medida que ha utilizado el Gobierno de Singapur para controlar el uso del vehículo privado en la ciudad, además ha implementado políticas dirigidas a controlar activamente la propiedad del automóvil. En la década de 1950, creó una tasa de registro adicional de vehículos denominada (ARF) cuya finalidad fue limitar el crecimiento del número de vehículos. Complementariamente en 1975

creó la tasa de registro adicional preferencial de vehículos (PARF) que aplicaba descuentos en los impuestos a aquellos propietarios que adquirirían vehículos nuevos y menos contaminantes. En 1980, la tasa (ARF) equivalía al 150% del precio de mercado del automóvil lo que hizo disuadir la adquisición y renovación de vehículos.

En la década de los 90, como resultado del rápido desarrollo y crecimiento económico de Singapur, se estableció un sistema de cuota vehicular denominado (VQS) para controlar el crecimiento de su parque automovilístico. El sistema consistía en que cada individuo que quisiera comprar un vehículo nuevo debía obtener un certificado de titularidad (COE) a través de un sistema de licitación competitivo. Este certificado permitía a sus usuarios utilizar durante 10 años el sistema de transporte por carretera. Mensualmente, en función de la tasa de crecimiento de la población, el Gobierno determinaba el número de (COE's) disponibles. Para abordar una equidad social los vehículos se clasificaban según su motorización en diferentes categorías. Cada categoría tenía su propia cuota (COE) de esta manera se lograba que los grupos socialmente vulnerables no compitieran con grupos adinerados en la misma categoría.

El sistema VQS logró reducir drásticamente la tasa media de crecimiento anual del parque vehicular de Singapur desde el 9,8% al 3% (Toh & Phang, 1997). A pesar de estos buenos resultados, el Gobierno de Singapur siguió mejorando esta tendencia logrando en el año 2009 una tasa de crecimiento anual del 1,5% que mejoró aún más en los años 2012, 2013 y 2015 con tasas del 1.0%, 0.5% y 0,25%, respectivamente. Los cambios en las licitaciones públicas del número disponible de (COE's) provocaba que el precio de la prima (COE) para los vehículos de la categoría A<sup>20</sup> se viera afectado significativamente, como se puede apreciar en la Figura 5. Desde el año 2009, debido a la recuperación económica, el precio de la tasa (COE) se disparó lo que hizo reducir la tasa de crecimiento anual del parque vehicular en la ciudad.

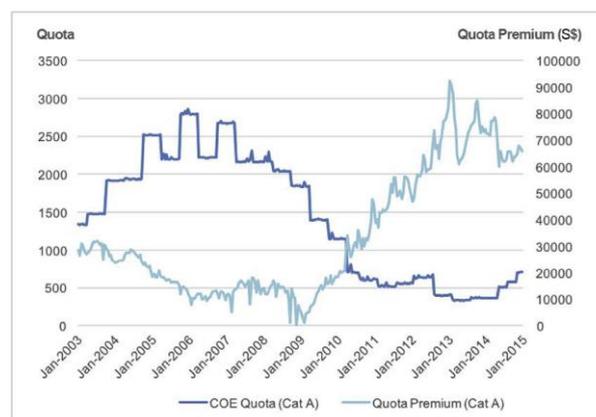


Figura 5. Número disponible de (COE'S) y precio de la cuota para vehículos de categoría A. Fuente: (Diao, 2018).

<sup>20</sup> Los vehículos de categoría A con aquellos de cilindrada igual o inferior a 1600 cm<sup>3</sup> con potencias que excedan de 97 kw.

En la Tabla 5 se muestra el desglose detallado de los costes de adquisición de vehículos nuevos en Singapur. La tabla muestra que la tasa (COE) es el componente principal a la hora de adquirir un vehículo y puede llegar a ser entre 2 y 3.2 veces el valor del vehículo.

Make	Model <sup>1</sup>	COE	Engine Capacity (cc)	Average OMV <sup>2</sup>	GST & Excise Duty <sup>3</sup>	Tiered ARF Payable <sup>4</sup>	CEVS <sup>5</sup> Rebate/ Surcharge	Registration Fee	COE (05/2014 1st Bidding)	Selling Price Quoted by Authorized Distributors <sup>6</sup>	
										w.o. COE	w. COE
Toyota	Corolla Altis 1.6L CVT Petrol	A	1598	18,686	5307	18,686	-5000	140	60,002	66,888	116,888
Toyota	Camry 2.0 Auto Petrol	B	1998	25,412	7217	27,577	0	140	70,002	102,888	157,888
Toyota	Lexus ES250 Auto Petrol	B	2494	35,305	10,027	41,427	0	140	70,002	158,000	222,000

<sup>1</sup> Based on local authorized distributors' registered models.

<sup>2</sup> Average Open Market Value (OMV) of new cars registered in the month.

<sup>3</sup> Duty payable at Singapore Customs includes Excise Duty @20% OMV and 7% Goods and Services Tax (GST).

<sup>4</sup> Tiered Additional Registration Fee (ARF) structure: 100% of OMV for the first \$20,000 of OMV, 140% of incremental OMV for the next \$30,000 of OMV, and 180% of incremental OMV for OMV above \$50,000.

<sup>5</sup> Carbon Emissions-Based Vehicle Scheme (CEVS): From 1 Jan 2013, subject to a minimum ARF payable of \$5000, cars with low carbon emissions will qualify for rebates, which are offset against the ARF payable. From 1 Jul 2013, cars with high carbon emissions will incur a corresponding registration surcharge.

<sup>6</sup> Car selling prices for May 2014 are provided by the Motor Traders Association of Singapore and other authorized distributors.

**Tabla 5. Desglose de costes en la adquisición de un vehículo en Singapur en junio de 2014. Fuente: (Diao, 2018).**

A pesar del alto coste de adquisición de un vehículo en Singapur, existen alternativas más económicas pero que implican restricciones en su uso. Para reducir el uso del automóvil en las horas pico, en 1994 se introdujo el concepto “Off-Peak Car” (OPC) o “Weekend Car” (WEC) para permitir a los singapurenses disfrutar del vehículo privado fuera de las horas punta y los fines de semana. En el año 2010 se revisó el esquema y se pasó a llamar “Revised Off-Peak Car” (ROPC)<sup>21</sup> reemplazando el esquema (OPC) y (WEC). El nuevo esquema implica la obtención de una licencia electrónica con un coste diario de 20 \$ por utilizar el vehículo entre las 7 a.m. y las 7 p.m. de lunes a viernes. A cambio, los propietarios del vehículo recibían un reembolso por adelantado de 17.000 \$ de la tasa (COE) y (ARF) así como un descuento de hasta 500\$ en el impuesto vial anual.

#### 4.2.2 Políticas encaminadas a proporcionar modos de transporte alternativos

El sistema de transporte público de Singapur desempeña un papel fundamental en las crecientes necesidades de viajes de los residentes, al tiempo que utiliza de manera eficiente el suelo disponible ayudando a reducir la congestión. Este sistema de transporte público está compuesto por el “Mas Rapid Transit” (MRT), “Light Rail Transit” (LRT), autobuses y taxis. El (MRT) es un sistema de transporte ferroviario, operativo desde 1987, con una red que abarca cerca de 200 kilómetros y cuenta con 119 estaciones. Las líneas de “Circle”, “Downtown” y “North East” están totalmente automatizadas y no necesitan conductor, conformando la red de metro automatizada más larga del mundo. Estas líneas ferroviarias son propiedad de “Land Transport Authority of Singapore” y son operadas por las concesionarias (SMRT Corporation) y (SBS Transit). Estos operadores también tienen concesiones en los servicios de autobuses y taxis, lo que facilita la integración de los servicios de transporte público de la ciudad. El sistema (LRT) es una red ferroviaria local que conecta

<sup>21</sup> Fuente: Land Transport Authority of Singapore. <https://www.lta.gov.sg/content/ltaweb/en/roads-and-motoring/transport-options-for-motorists/revised-off-peak-car-and-opc-and-weekend-car.html>

las estaciones del sistema (MRT) con viviendas públicas promovidas por (HDB)<sup>22</sup> en los barrios de Bukit Panjang, Sengkang y Punggol. Una de las grandes apuestas del Gobierno de Singapur, para reducir la dependencia del vehículo privado, es la expansión activa de las redes ferroviarias (MRT) y (LRT) que deben proporcionar a los viajeros un modo de transporte alternativo que sea confiable y competitivo. Por otro lado, el nivel de servicio de autobuses se ha ido mejorando gracias a la expansión de la flota de autobuses, carriles bus y gracias a un moderno sistema de información en tiempo real en las principales paradas.

Entre el año 1997 y el año 2012, la longitud total del sistema MRT se incrementó en más del 79% pasando de los 83 km a los 149 km durante ese periodo. Por su parte, el sistema LRT también experimentó un fuerte crecimiento en su red incrementándose su longitud desde los aproximadamente 8 km que tenía en el año 1999 a los más de 28 km del año 2012 (ver Figura 6 ). La “Land Transport Authority of Singapore” prevé que para el año 2030 el 80% de los hogares de Singapur dispongan de una estación ferroviaria a no más de 10 minutos caminado.

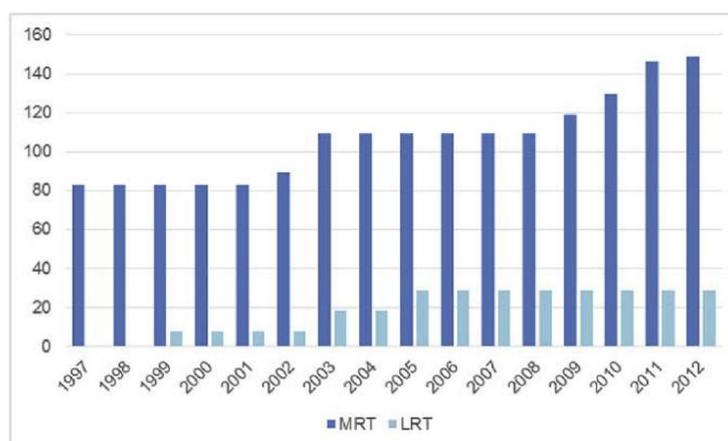


Figura 6. Longitud en (km) del sistema ferroviario MRT/LRT. Fuente: Land Transport Authority.

#### 4.2.3 Políticas encaminadas a integrar los usos del suelo en la planificación del transporte

El Gobierno de Singapur dispone de más de tres cuartas partes del suelo de la ciudad. Este hecho es clave para poder implementar políticas encaminadas a un desarrollo sostenible en el uso del suelo y en la planificación del transporte. Esta integración del uso del suelo con la planificación del transporte se puede ilustrar en tres niveles en el caso de Singapur.

##### a) Centros regionales y subregionales

A nivel macroscópico, Singapur ha adoptado una estructura espacial jerárquica de desarrollo urbano compuesta por el centro de la ciudad y centros regionales y subregionales. Estos últimos, representan zonas

<sup>22</sup> “Housing and Development Board” (HDB) es una junta estatutaria del Ministerio de Desarrollo Nacional de Singapur responsable de la vivienda pública en Singapur. El 82% de los habitantes de Singapur viven en viviendas públicas proporcionadas por el HDB.

comerciales de segundo y tercer nivel conectadas al centro de la ciudad mediante redes de transporte (ver Figura 7). Esta estructura espacial tiene como objetivo fomentar el uso del transporte público, aliviar la congestión del tráfico en el centro de la ciudad y lograr un equilibrio entre espacio de residencia y empleo, descentralizando las zonas de crecimiento urbano.

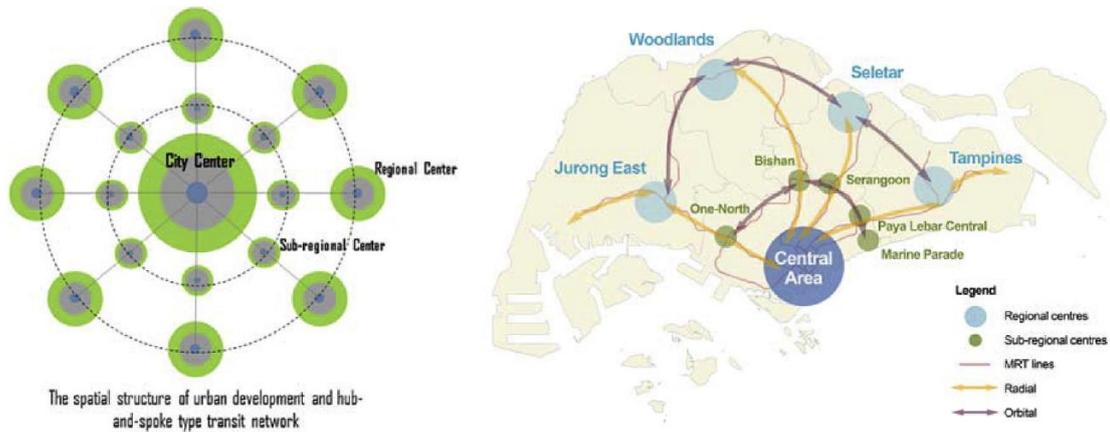


Figura 7. Estructura espacial urbana de Singapur. Fuente: (Diao, 2018).

b) Modelos de planificación urbana (HDB)

Las nuevas ciudades construidas en Singapur por la “Housing and Development Board (HDB)” desempeñan un papel fundamental en el desarrollo urbano de la ciudad, proporcionando más del 80% del parque de vivienda a los singapurenses. Estas nuevas ciudades siguen el principio de desarrollo urbano TOD<sup>23</sup> con una estructura jerárquica en tres niveles: recinto, vecindario y ciudad (ver Figura 8 ).

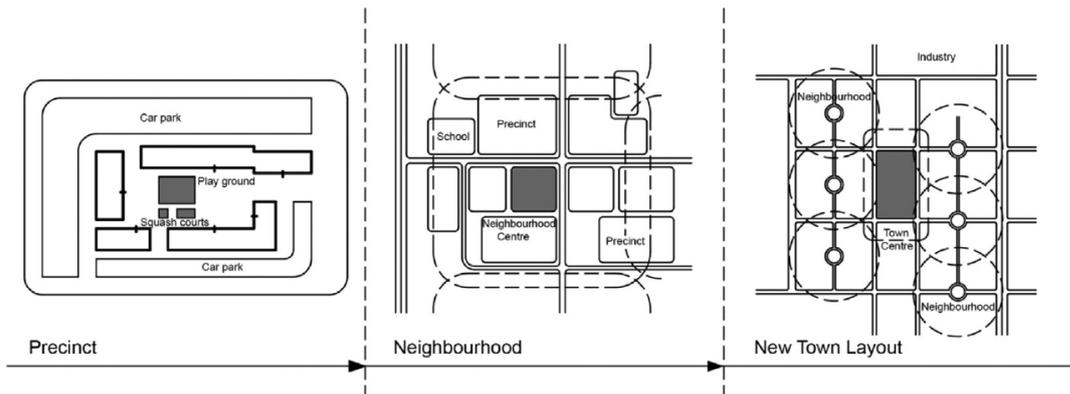


Figura 8. Estructura jerárquica de las nuevas ciudades. Fuente: (Diao, 2018).

El recinto es la unidad básica de planificación que normalmente contiene de cuatro a seis edificios públicos de vivienda. Unos cuantos recintos forman un vecindario, y una ciudad está compuesta por varios vecindarios. La provisión de espacio también sigue una jerarquía. El centro de la ciudad tiene un grupo de

<sup>23</sup> TOD (Transited Oriented Development) es una herramienta que ayuda a evaluar la forma y desarrollo urbano de una ciudad. Aborda la forma de hacer crecer una ciudad maximizando los beneficios del transporte público y desarrollando un entorno urbano elevadas cantidades de espacio residencial, comercial y de ocio a poca distancia del transporte público. El desarrollo urbano orientado al transporte es una respuesta a la expansión urbana insostenible, a la dependencia del automóvil, al tráfico deficiente, decadente y pobre que ha caracterizado el crecimiento de las ciudades en todo el mundo en el último siglo.

instalaciones como centros comerciales, cines y bancos. Los vecindarios están equipados con supermercados mientras que los recintos sólo disponen de tiendas convencionales de venta al por menor. Las estaciones ferroviarias MRT se encuentran ubicadas en los centros urbanos, que unen la ciudad HBD con el centro financiero y otras ciudades. Este tipo de ciudades se diseñan para que sus habitantes puedan satisfacer la mayoría de sus necesidades diarias.

c) Centros de transportes integrados

En el nivel microscópico se desarrollan centros de transporte integrados en los centros urbanos conectando las zonas de uso comercial y residencial. Estos centros de transporte integrados, que disponen de conexiones con diferentes modos de transporte (autobuses y ferrocarril), proporcionan a sus usuarios una amplia gama de servicios alternativos como tiendas, restaurantes, oficinas de servicios sociales e incluso instalaciones deportivas para que los viajeros puedan cubrir sus necesidades diarias ahorrando viajes adicionales.

#### **4.2.4 Direcciones claves de las políticas de transporte en Singapur**

Si observamos la tendencia en las políticas de transporte aplicadas en Singapur nos revelan tres direcciones estratégicas de su planificación del transporte.

a) Inteligencia de su sistema de transporte

Para mejorar su eficiencia, Singapur está tratando de mejorar su sistema de transporte, no sólo aplicando y diseñando políticas inteligentes de transporte sino instalando y desarrollando sistemas inteligentes de transporte. El sistema “Green Link Determination System (GLIDE)” es uno de los sistemas inteligentes de transporte que permite controlar y monitorear el sistema semafórico de la ciudad, adaptando los ciclos semafóricos en función del volumen de tráfico real de la red de transporte; el sistema “Expressway Monitoring and Advisory System (EMAS)” es un sistema que, con la ayuda de dispositivos inteligentes, permite detectar incidentes y congestión. Singapur también cuenta con portales webs y aplicaciones móviles para informar sobre el estado del tráfico, así como paneles de información de tráfico que permiten informar en tiempo real de la llegada de autobuses o de los parkings disponibles en la ciudad. Por otro lado, el sistema de transporte público de Singapur dispone de tarjetas integradas de transporte y dispositivos transpondedores para el pago del peaje urbano. En la ciudad nos encontramos con un gran número de sensores inteligentes que permiten recoger y transmitir datos de tráfico en tiempo real para administrar el sistema de transporte, lo que permite variar tarifas de peaje y estacionamiento en función de las necesidades. Estos sistemas inteligentes de tráfico hacen que el sistema de transporte de la ciudad de Singapur sea más eficiente, flexible y justo que un sistema tradicional.

En cuanto al sistema electrónico de peaje urbano (ERP) de Singapur, indicar que es uno de los principales sistemas inteligentes de transporte en el mundo con una tecnología capaz de realizar tarificación dinámica. El sistema de peaje urbano desarrollado por el Gobierno de Singapur permite aplicar tarifas variables en función de la demanda y del uso real que se hace de la infraestructura de transporte, de tal manera que el

pago de la tarifa se percibe más justa. Por lo general, en las horas pico se establece una tarifa más elevada para alentar a los usuarios del vehículo privado a circular en horas valle y beneficiarse de importantes descuentos. Además, el sistema ha evolucionado hasta tener la capacidad de aplicar diferentes tarifas, no sólo en función del tiempo sino también en función de la ubicación y tipo de automóvil. De esta manera las tarifas se pueden ajustar según las condiciones de tráfico predominantes. El coste de estos transpondedores, conocidos como “In-vehicle Unit (IU)”, es de 150 \$, siendo obligatoria su instalación para circular por el área tarifada. La tecnología del transpondedor (IU) fue desarrollada y vendida al Gobierno de Singapur por la empresa “Mitsubishi Heavy Industries Ltd,” y el proyecto fue encabezado por un consorcio compuesto por las empresas “Philips Singapore Pte Ltd., Mitsubishi Heavy Industries Ltd., Miyoshi Electronic Corporation y CEI Systems and Engineering”. Actualmente, el Gobierno de Singapur está desarrollando un nuevo sistema de peaje urbano basado en tecnología GPS para aplicarlo en un futuro próximo y que sustituirá al actual sistema ERP.

La ciudad de Singapur también ha implementado medidas para aliviar la congestión y aglomeración de los modos ferroviarios durante las horas pico de la mañana. En este caso, encontramos una política similar a la aplicada en el vehículo privado y consiste en introducir, con la ayuda de la tarjeta inteligente “EZ-link”, tarifas variables en los sistemas de transporte ferroviario y de autobuses. Desde 2013, los viajeros que salen antes de las 7:45h de la mañana desde las 18 estaciones de “MRT” de la ciudad disfrutan de pasaje gratuito, por su parte aquellos que salen entre las 7:45h y 8:00h disfrutan de descuentos del 50%. Según “Land Transport Authority” de Singapur esta política de precios ha hecho que un 7% de los viajeros que viajaban inicialmente en horario pico cambiaran a una franja horaria con descuento<sup>24</sup>.

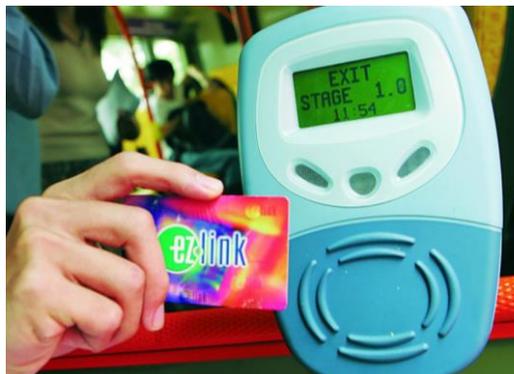


Figura 9. Tarjeta inteligente de transporte público “EZ-link”. Fuente. [www.ezlink.com](http://www.ezlink.com)

#### b) Inclusión social

La planificación del transporte de Singapur tiene como objetivo satisfacer las necesidades de movilidad de todos los grupos sociales, intentando proporcionar servicios de transporte asequible a grupos socialmente vulnerables.

---

<sup>24</sup> Fuente: “The Straight Times. Free early morning MRT rides in city area extended to 2017”  
<https://www.straitstimes.com/singapore/transport/free-early-morning-mrt-rides-in-city-area-extended-to-2017>

El transporte público, que es el modo de transporte principal de aquellos singapurenses que no disponen de vehículo privado, se financia con la ayuda de los impuestos vehiculares y los ingresos del peaje urbano de Singapur. Según el Gobierno de Singapur en el año 2017 los ingresos por la tasa vehicular (COE), que llegaron a los 6.9 billones de dólares, representaron un 10% de los ingresos operativos totales del Gobierno. Por otro lado, los ingresos generados por la tasa de vehículos a motor<sup>25</sup> representaron otro 3.4%. El sistema electrónico de peaje urbano (ERP) ingresó en 2013 unos 160 millones de dólares y 152 millones de dólares en 2014. Estos ingresos permitieron al Gobierno de Singapur invertir en infraestructuras de transporte y apoyar al transporte público, subvencionado parte del servicio lo que ayudó a mantener las tarifas. Esta redistribución de ingresos contribuye a mantener una igualdad social en Singapur.

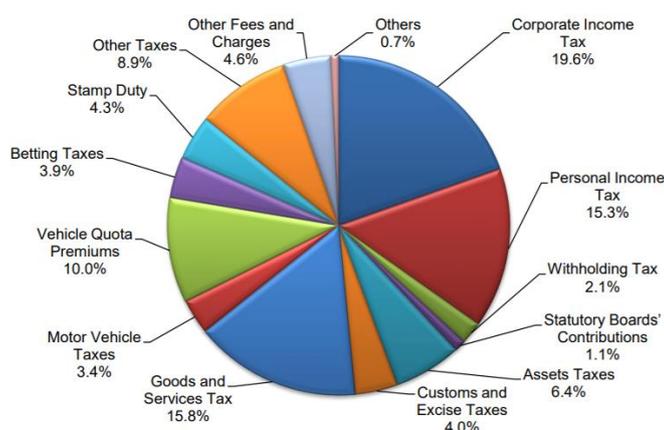


Figura 10. Desglose de ingresos operativos del Gobierno en el año 2016. Fuente: Gobierno de Singapur ([https://www.singaporebudget.gov.sg/budget\\_2017](https://www.singaporebudget.gov.sg/budget_2017)).

### c) Medio ambiente

Singapur ha sido pionera en implementar medidas orientadas a reducir la contaminación derivada de la dependencia en el uso del automóvil. Su Gobierno promueve activamente el uso de transporte público ecológico apostando por la extensión de su red ferroviaria de transporte. Como hemos visto, ha implementado importantes medidas orientadas a restringir la propiedad y el uso del vehículo privado como el VQS, ALS, ERP y LTA, pero también encaminadas a promover la adquisición de vehículos poco contaminantes mediante subvenciones. Por el contrario, grava mediante impuestos la adquisición de vehículos que generen altos niveles de gases contaminantes.

### 4.2.5 Tendencias en la movilidad de Singapur

La intervención política sobre la movilidad en Singapur ha rediseñado el comportamiento de los viajes de sus residentes durante las últimas décadas, por ello a continuación, con la ayuda de los datos estadísticos

<sup>25</sup> La tasa de vehículos a motor incluye la tarifa de registro, impuestos de circulación, impuestos especiales a motores por combustión, tarifas por número de asientos en vehículos y licencia de vehículos no motorizados.

de la LTA (Land Transport Authority of Singapore)<sup>26</sup>, analizaremos brevemente el impacto que han tenido estas políticas en los patrones de movilidad de la ciudad.

a) Disminuir el uso del automóvil y estabilizar el crecimiento en la adquisición de vehículos

Como hemos visto, el Gobierno de Singapur ha restringido la dependencia de vehículos privados implantando diferentes impuestos a su propiedad y uso. La principal finalidad de estos impuestos es hacer costosa la propiedad del vehículo privado y alentar el uso del transporte público. Sin embargo, vale la pena señalar que a pesar de estas medidas la adquisición de vehículos en Singapur ha ido en aumento. Según la LTA (ver Figura 11), en el año 2002 la ratio de vehículos en propiedad por cada 1000 habitantes era de algo más de 90%, mientras que en el año 2010 esta ratio subió hasta casi el 101 %, un 11% más. En el año 2010 se observa una ralentización del ritmo de motorización de la ciudad, fundamentalmente, debido a la aplicación de un estricto sistema de control en la adquisición de nuevos vehículos. El sistema impone una cuota máxima anual de vehículos registrados. Esta cuota pretende hacer coincidir el número anual de nuevos vehículos registrados con el número anual de vehículos dados de baja.

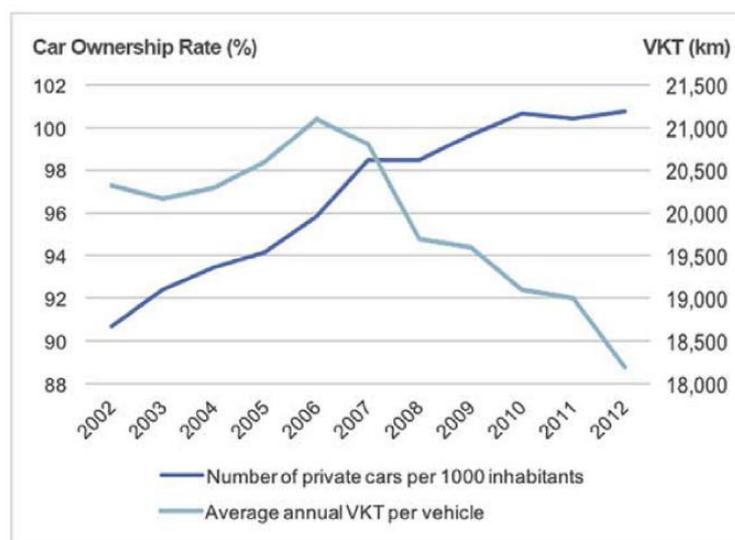


Figura 11. Ratio de motorización y media anual de vehículos por kilómetro (VKT). Fuente: LTA (Land Transport Authority).

A pesar del incremento gradual en la tendencia de adquisición de vehículos en propiedad, el uso del vehículo privado en Singapur ha disminuido considerablemente durante los últimos años. Analizando la Figura 11 vemos una disminución significativa en el número de vehículos kilómetros entre el año 2006 y el año 2012. Entre estos años, se ha producido una disminución cercana a los 3000 VKT, en parte, gracias al impacto combinado del aumento en los costes del uso del vehículo privado y la expansión del sistema

<sup>26</sup> La Autoridad de Transporte Terrestre (LTA) es una junta estatutaria del Ministerio de Transporte, que encabeza los desarrollos de transporte terrestre en Singapur. Como organismo encargado de planificar, diseñar, construir y mantener la infraestructura y los sistemas de transporte terrestre de Singapur, pretenden crear un sistema de transporte público más ecológico y más incluyente, complementado con opciones convenientes para caminar y andar en bicicleta desde los hogares hasta los destinos. Aprovechan la tecnología para fortalecer la infraestructura ferroviaria y de autobuses y proporcionar opciones interesantes para el transporte. Tiene competencias en ferrocarril, redes de autobuses y proyectos de carreteras.

ferroviario. (Goletz, Heinrichs, & Feige, 2016) indican que, debido al creciente aumento en el precio de la adquisición de automóviles en Singapur, su propiedad se considera cada vez más un símbolo de estatus social. Este hecho hace que personas, sin necesidades reales ni recursos financieros para adquirir un vehículo, lo hagan para mostrar su éxito de cara a los demás.

b) Incremento en el uso del sistema ferroviario

Durante la pasada década, el Gobierno de Singapur extendió significativamente la red de transporte ferroviario en la ciudad. Este hecho ha provocado que cada vez más personas hayan podido optar a utilizar el transporte público en lugar del vehículo privado. En la Figura 12 podemos ver el aumento significativo en el número de usuarios del sistema de transporte público ferroviario MRT/LT durante el periodo de estudio. El Gobierno de Singapur espera que esta tendencia siga en el futuro ya que planea seguir financiando la expansión de la red de ferrocarril (Center Liveable Cities Singapore, 2014).

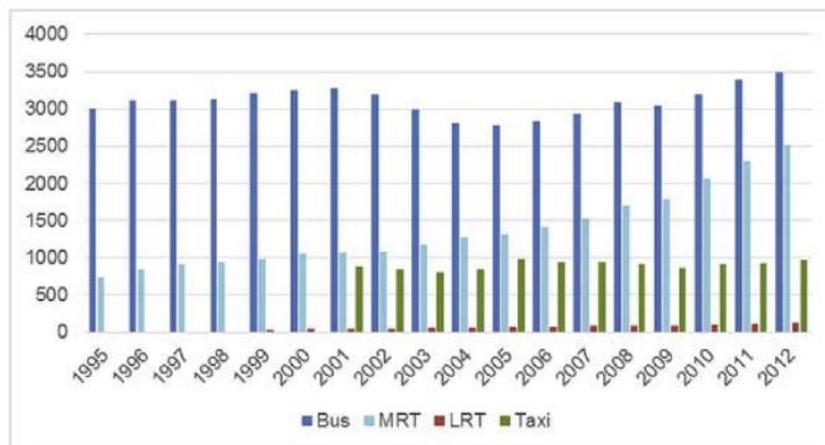


Figura 12. Número de viajeros en transporte público (en miles). Fuente: LTA (Land Transport Authority of Singapore).

No hay que olvidar que la accesibilidad a los modos ferroviarios tiene un impacto notable en el comportamiento de los viajeros a la hora de elegir el ferrocarril como modo de transporte para realizar el viaje. Según un estudio realizado por la LTA (Land Transport Authority of Singapore), aproximadamente el 71% de las personas que vivían a menos de 400 metros de una estación de ferrocarril en Singapur utilizaban este medio de transporte como su principal modo de viaje diario, en comparación con el 67% y el 55% que vivían a 800 metros y 2km, respectivamente.

c) Mitigación de la congestión del tráfico

Con la ayuda del sistema de peaje urbano ERP, la ciudad de Singapur ha logrado mitigar satisfactoriamente durante los últimos años el aumento del parque de vehículos. Como se muestra en la Figura 13, durante el periodo de estudio, el parque de vehículos en Singapur aumentó alrededor del 37% pasando de los 0.7 millones de vehículos en el año 2002 a los 0.97 millones en el año 2012.

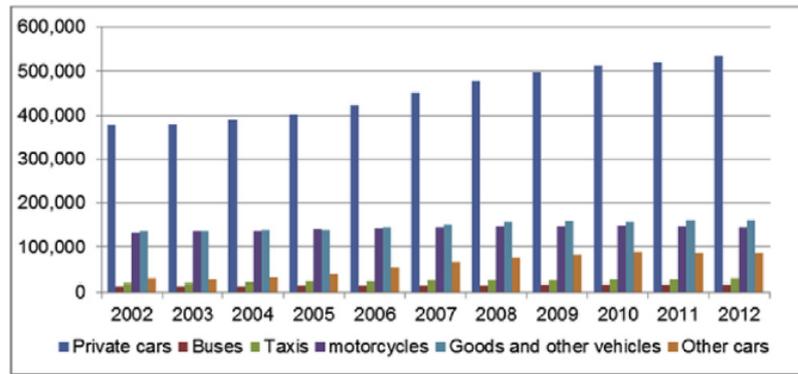


Figura 13. Parque de vehículos en Singapur. Fuente: LTA (Land Transport Authority of Singapore).

A pesar del constante aumento del número de vehículos en Singapur, la ciudad ha logrado mantener unos niveles aceptables de congestión. Como podemos observar en la Figura 14, la velocidad media de circulación en la ciudad permaneció estable tanto en sus arterias principales como en sus vías rápidas.

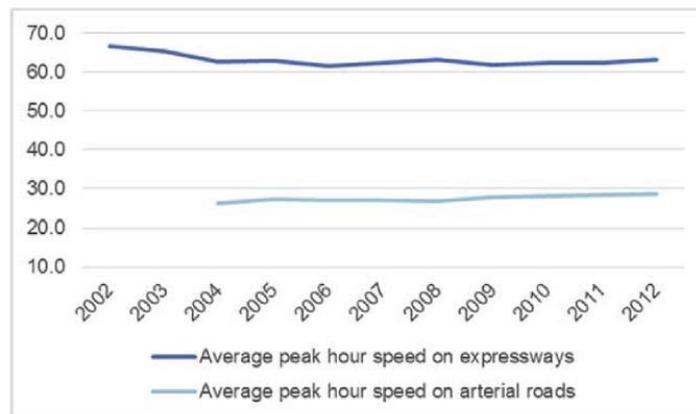


Figura 14. Velocidad media en horas punta. Fuente: LTA (Land Transport Authority of Singapore).

#### d) Precio asequible del transporte público

Las tarifas promedio del sistema de transporte MRT y del sistema de autobús fueron de aproximadamente 0.85 y 0.61 \$/pax-viaje, respectivamente. Estas tarifas son, en general, inferiores a las que podemos encontrar en otras ciudades como Hong Kong, Londres, Nueva York y Tokio. Adicionalmente existen descuentos para niños, personas mayores, estudiantes, personas con bajos ingresos y discapacitados.

#### 4.2.6 Conclusiones

El modelo de planificación del transporte de Singapur ha demostrado ser una gran solución para gestionar los problemas producidos por la elevada tasa de motorización de la ciudad, así como un gran aliado para promover el uso de un transporte urbano sostenible siempre bajo la presión del desarrollo económico, el crecimiento de la población y las limitaciones de suelo.

Con la ayuda de las nuevas tecnologías aplicadas en el sector del transporte, Singapur ha conseguido implementar un sistema de peaje urbano flexible y dinámico que juega un papel central en la planificación del transporte. Este sofisticado sistema ayuda a la LTA a capturar el coste real de los viajes permitiendo un uso más eficiente de las infraestructuras y servicios. La LTA prevé que en el año 2020 este operativo la nueva generación del sistema de peaje urbano ERP que llevará implementado un sistema global de navegación por satélite (basado en GNSS) compatible con el actual sistema automático de peaje.

La ciudad de Singapur ha logrado aplicar políticas para mejorar la movilidad con un enfoque integral y sistemático que han permitido reducir la dependencia del uso del vehículo privado. Esta integración se refleja en múltiples aspectos, incluyendo la combinación de controlar la propiedad y el uso del automóvil, estrategias de mejora en la provisión de transporte, integración del desarrollo urbano, uso del suelo en la planificación del transporte, así como la conexión de múltiples modos en el sistema de transporte.

El Gobierno de Singapur ha abogado por la necesidad de implantar mecanismos para lograr la sostenibilidad financiera y social. En esta línea ha promovido la construcción y operación de un eficiente y asequible sistema de transporte público que ha requerido de considerables recursos. La recaudación de impuestos y las tarifas aplicadas al vehículo privado han logrado generar importantes ingresos públicos con los que el Gobierno ha podido subsidiar el sistema de transporte público de la ciudad. Este sistema de redistribución de ingresos ha permitido al Gobierno de Singapur mejorar sus infraestructuras y servicios públicos, así como mantener la igualdad social en la ciudad.

Comprender las experiencias de Singapur no sólo sirve para que Singapur mejore sus necesidades futuras de movilidad, sino que son importantes para que otras ciudades puedan lograr un sistema de transporte sostenible. A pesar de la peculiaridad de Singapur como un pequeño estado insular, algunas de sus innovaciones en el transporte han sido aplicadas en otras ciudades logrando excelentes resultados. Es el caso del “congestion charging” de Londres y de Estocolmo, así como la subasta de licencias de vehículos privados de Shanghái. El éxito del modelo de transporte de Singapur demuestra ser una estrategia viable para gestionar la congestión de tráfico en ciudades.

### **4.3 El caso de Londres. The London Congestion Charge**

#### **4.3.1 Antecedentes**

A finales de la década de los 90 diferentes encuestas realizadas en Londres revelaron preocupaciones públicas y empresariales sobre el transporte en la ciudad, en particular sobre la congestión del tráfico, el transporte público y la calidad del aire. Según los informes publicados por “*Transport for London*”<sup>27</sup> la velocidad media de circulación en el centro de Londres se había ido reduciendo progresivamente desde el

---

<sup>27</sup> Transport for London (TfL) es el organismo del gobierno local responsable de la mayoría de los aspectos del sistema de transportes en Londres, Inglaterra. Su rol es implementar las estrategias de transporte y administrar los servicios de transporte de Londres.

año 1977 (ver Figura 15 ). Como consecuencia a estas preocupaciones ciudadanas “The Greater London Authority” creó en el año 1999 una autoridad para mejorar los problemas de transporte del área metropolitana de Londres, compuesta por el alcalde y la asamblea de Londres, con el objetivo de implementar tarifas en ciertas áreas de Londres tanto para el estacionamiento como para la circulación urbana vehicular.

Figure 1. Central London Average Traffic Speeds, 1977–2009

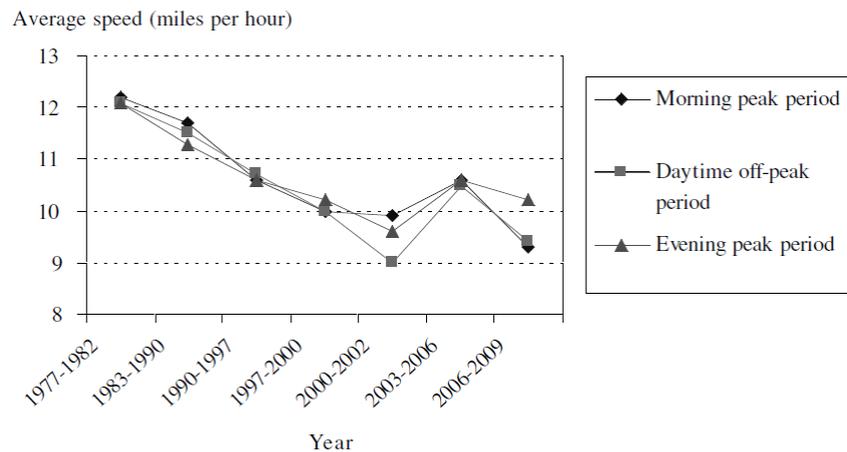


Figura 15. Velocidad media del tráfico en el centro de Londres. Fuente: (Santos, G., Button, K., Noll, 2008).

La propuesta de implantar en Londres una tasa por congestión para vehículos fue el discurso central de la campaña política del candidato a la alcaldía de Londres Ken Livingston que, finalmente, fue elegido alcalde en mayo del año 2000. Después de su nombramiento Livingston siguió adelante con la idea de implantar algún tipo de peaje urbano en la ciudad por lo que se apoyó en diferentes informes técnicos que recomendaban la medida como el informe ROCOL (2000)<sup>28</sup>. El objetivo principal que se pretendía con el peaje urbano de Londres era reducir la congestión de tráfico en la zona central de la ciudad (CZ). Los políticos, basándose en el informe ROCOL y en diferentes estudios de la *Transport for London*, esperaban que el esquema de peaje urbano de Londres causase las siguientes mejoras sobre la movilidad en la ciudad:

- Incremento en el número de usuarios del transporte público que viajaban hacia el centro de Londres durante las horas pico de la mañana, en concreto estimaron un aumento en 15.000 usuarios nuevos para el autobús y 5.000 usuarios para el metro.
- Reducción del tráfico en la zona de aplicación del peaje entre un 10% y un 15% con la consiguiente reducción, entre un 20% y un 30%, de las colas y el aumento de la velocidad media de circulación entre un 10% y 15%.

<sup>28</sup> ROCOL Working Group (2000). *Road Charging Options for London: A Technical Assessment*. Fue un grupo de trabajo que elaboró el primer informe técnico que revisó las opciones disponibles en Londres para implementar una tasa por congestión. Para ello realizó encuestas ciudadanas y evaluó el impacto y diseño del proyecto.

- Fuera del área afectada por el peaje urbano, se esperaba que el tráfico podría aumentar en las rutas orbitales hasta un 5% y que disminuyera entre un 5% y un 10% en las rutas radiales, causando en el conjunto del sistema una reducción total del tráfico entre el 1% y el 2%.

Además de los efectos beneficiosos esperados por el peaje urbano de Londres sobre el conjunto del sistema de transporte de la ciudad, los políticos esperaban que el peaje tuviera unos ingresos netos anuales de 130 millones de libras que pretendían revertir en proyectos de mejoras de transporte público para la ciudad. Como veremos con más detalle más adelante, finalmente el peaje urbano londinense logró mejorar las previsiones estimadas de reducción de tráfico en la ciudad, sin embargo, no logró cumplir con los objetivos de ingresos netos previstos.

### 4.3.2 Introducción

El peaje urbano de Londres fue implementado y diseñado por *Transport for London (TfL)* y entró en funcionamiento el 1 de febrero del año 2003. A partir de esta fecha los vehículos que viajaban al centro de Londres debían pagar una tasa, llamada tasa por congestión, para poder acceder al centro de la ciudad. La tasa por congestión de Londres es un ejemplo de un sistema de peaje urbano de área donde se aplica una tarifa diaria a todos aquellos vehículos que entran, salen o se mueven dentro de la zona urbana afectada por el peaje. El área afectada por el peaje urbano de Londres cubre una superficie de 21 Km<sup>2</sup>, de los 1.579 Km<sup>2</sup> del Gran Londres y cuenta con un total de 174 puntos de control compuestos por cámaras con tecnología basada en sistemas ANPR “Automatic number plate recognition” que permiten identificar la matrícula de los vehículos que acceden al peaje y verificar si estos han abonado o no la tarifa. Esta tecnología cuenta con una tasa de acierto en el reconocimiento de las matrículas de más del 90%, a pesar de ello, también existen unidades móviles con cámaras con la misma tecnología ANPR que se pueden desplegar en cualquier punto dentro del área afectada por el peaje.

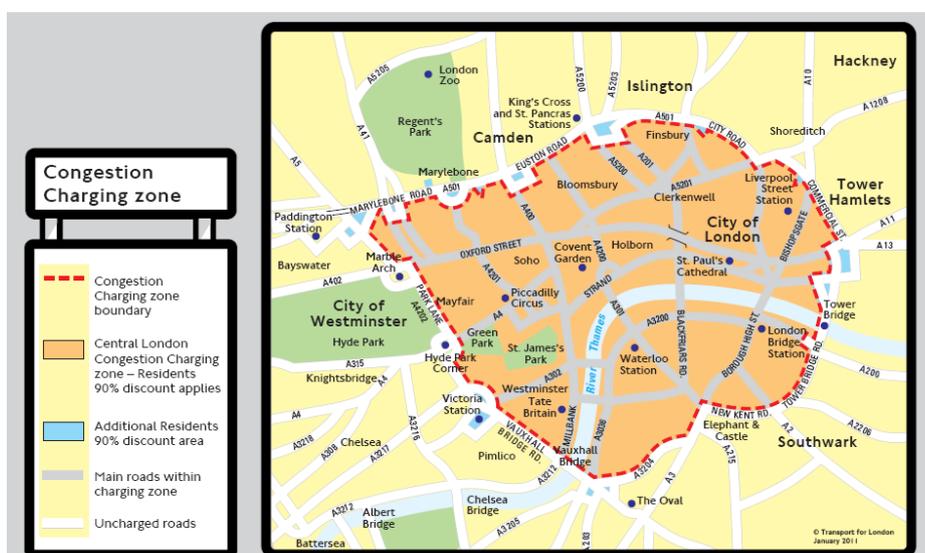


Figura 16. Área “congestion charging” de Londres. Fuente: TfL (Transport for London).



Figura 17. “Congestion charge” de Londres.

El periodo de funcionamiento del peaje urbano de Londres incluye todos los días laborales de 7:00 a.m. a 06:00 p.m. e inicialmente presentó una serie de descuentos o exenciones (ver Tabla 6). Las autoridades del transporte han establecido sanciones, de hasta 165€ por día, en el caso de detectar un vehículo no registrado en el sistema y sin la previa liquidación de su correspondiente tasa. Recientemente *Transport for London (TfL)* ha complementado el modelo de peaje urbano inicial “congestion charge” con una zona de ultra bajas emisiones denominada ULEZ<sup>29</sup>, donde sólo se permita la circulación de vehículos a gasolina con categoría Euro 4 y diésel con categoría Euro 6, según la normativa europea vigente sobre emisiones para turismos.

Discount/status	Category
Fully exempt	Motorcycles, mopeds and bicycles Emergency vehicles Public service vehicles with 9 or more seats licensed as buses Vehicles used by disabled persons that are exempt from VED <sup>a</sup> Licensed London taxis and mini-cabs
100% discount with free registration	Certain military vehicles Local government service vehicles (e.g. refuse trucks, street maintenance) Vehicles with 9 or more seats not licensed as buses (e.g. community minibuses)
100% discount with a one-off £10 registration	Vehicles driven for or by individuals or institutions that are Blue Badge holders <sup>b</sup>
100% discount with £10 registration per year	Alternative fuel vehicles – requires emission savings 40% above Euro IV standards Roadside assistance and recovery vehicles (e.g. motoring organizations such as the Automobile Association)
90% discount with £10 registration per year	Vehicles registered to residents of the central zone

<sup>a</sup> VED: Vehicle excise duty.

<sup>b</sup> Blue Badges, which existed before the scheme was implemented, are special parking permits issued to disabled people to allow them to park near shops, stations, and other facilities. The badge belongs to the disabled person who qualifies for it (who may or may not be a car driver) and can be used in any vehicle they are travelling in. The discount applies to individual Blue Badge holders anywhere in the EC.

Tabla 6. Excepciones y descuentos del peaje urbano de Londres. Fuente: Santos, G (2006).

<sup>29</sup> ULEZ: del inglés “Ultra Low Emission Zone” o Zona de Ultra Bajas Emisiones.

### 4.3.3 Los primeros años del “London Congestion Charge”

#### a) Impactos sobre el tráfico en la zona central de Londres

Según el informe del año 2004 de *Transport for London*, durante el primer año de funcionamiento del peaje urbano de Londres, el tiempo medio de viaje dentro de la zona de peaje fue de entre 3.5 y 3.7 minutos por km, lo que equivale a una velocidad promedio de circulación de entre 16 y 17 km por hora. Esta nueva situación representó un aumento de la velocidad media de circulación respecto al año anterior, antes de introducir la tasa, de entre el 14% y el 21%. Por otro lado, el peaje de Londres logró reducir en un 18% el número de vehículos que ingresaban a la zona tarifada durante su horario de funcionamiento. En la Tabla 7 se muestra el porcentaje de variación interanual, en vehículos-kilómetros, de vehículos que entraban y salían de la zona afectada por el peaje. Como era de esperar durante el periodo 2002-2006 observamos una reducción de los vehículos privados y un aumento de aquellos modos de transporte exentos del pago de la tasa.

**Table 4. Year-on-Year Percent Change in Vehicle-Kilometers Driven within the Original CZ during Charging Hours<sup>a</sup>**

Percent change					
Vehicle type	2002–03	2003–04	2004–05	2005–06	2002–06
All vehicles	-12	-5	+1	+1	-14
Four or more wheels	-15	-6	0	+1	-19
Potentially chargeable	-25	-6	-1	+3	-28
Cars	-34	-7	-1	+4	-37
Vans	-5	-4	-4	+3	-9
Trucks and other	-7	-8	+8	+2	-7
Licensed taxis	+22	-7	+5	-5	+12
Buses and coaches	+21	+5	-1	+3	+25
Powered two-wheelers <sup>b</sup>	+6	-2	0	-3	0
Pedal cycles	+28	+4	+14	-2	+43

Source: TfL (2007b, table 2.4, p. 26).

a. Annualized weekday for 2002, 2003, 2004, 2005, and 2006.

b. Powered two-wheeler trends are relatively volatile, reflecting weather and fashion.

**Tabla 7. Variación de vehículos-kilómetros de la zona central de peaje entre 2002 y 2006. Fuente: (Santos, G., Button, K., Noll, 2008).**

Uno de los principales objetivos que se perseguía con la introducción de la tasa por congestión de Londres era reducir la congestión de tráfico en el centro de la ciudad. Durante los dos primeros años de funcionamiento del peaje, la congestión en Londres se logró reducir significativamente. Según *Transport for London*, durante los años 2003 y 2004, el peaje urbano de Londres logró reducir la congestión en un 30%, respecto a la situación previa a la introducción de la tasa. A pesar de que durante el tercer año la reducción en la congestión no fue tan elevada, como la experimentada durante los dos primeros años, siguió siendo inferior a la que hubo antes de introducir la tasa. Durante el periodo 2002-2005 se estimó que la congestión se había reducido alrededor del 22%. Por otro lado, ya en el año 2006, el informe de *Transport for London* de ese año indica que la congestión en la ciudad de Londres sólo se había reducido un 8%. Existen una serie de razones que pueden explicar este empeoramiento:

- Existencia de una gran cantidad de obras viales especialmente en el segundo semestre del año 2006.

- Aplicación de programas de gestión del tráfico para reducir el número de accidentes.
- Implementación de mejoras en el servicio de autobuses.
- Mejor calidad ambiental para peatones y ciclistas.

Al parecer todas estas actuaciones llevadas a cabo durante el año 2006 pudieron influir en los malos resultados de congestión conseguidos en este periodo.

### b) Impactos en el transporte público

Con anterioridad a la aplicación del peaje urbano de Londres, *Transport for London* acometió una serie de mejoras en la red de transporte público de la ciudad. Las principales actuaciones realizadas estuvieron orientadas a mejorar el sistema de autobuses urbano ampliando su número de paradas, aumentando su frecuencia y combinaciones, además de crear nuevas rutas e incrementar su capacidad.

Durante el periodo 2003-2004, con el peaje urbano introducido, se observó en Londres un aumento significativo en el número de pasajeros del sistema de autobuses. En la Tabla 8 se muestran los principales cambios observados.

	AM peak (7:00 am–10:00 am)			Charging hours (7:00 am–6:30 pm)					
	Inbound			Inbound			Outbound		
	Passengers	Buses	Passengers per bus	Passengers	Buses	Passengers per bus	Passengers	Buses	Passengers per bus
Autumn 2002	77 000	2400	32	193 000	8280	23	163 000	7800	21
Autumn 2003	106 000	2950	36	264 000	10 500	25	211 000	9900	21
Percentage difference	+38	+23	+12	+37	+27	+8	+29	+26	+2

**Tabla 8. Pasajeros y autobuses que cruzan la zona de peaje urbano. Fuente: *Transport for London*, 2005b.**

Podemos decir que el aumento en el uso del sistema de autobuses públicos de Londres no fue sólo consecuencia del peaje urbano, debido al cambio de modo de transporte de aquellos usuarios que iban en vehículo privado y querían evitar el pago de la tasa por congestión transfiriéndose al transporte público, sino que también fue inducido por las mejoras realizadas con anterioridad en el sistema de autobuses de la ciudad (*Transport for London*, 2005b).

En cuanto a la velocidad media de los autobuses dentro de la zona de peaje se observó que aumentó hasta un 7% durante el primer año. En líneas generales, los tiempos de espera de los usuarios de este transporte decrecieron un 24% en el Gran Londres y un 30% alrededor de la zona de peaje según los informes de *Transport for London* del año 2005.

En lo que respecta al uso del Metro, se observó una disminución del 1% durante el primer año que fue recuperada en el 2004. Según *Transport for London* no fue la implantación del peaje urbano en Londres el

que hizo reducir su uso, sino que más bien fueron las mejoras introducidas en el sistema de autobuses las que hicieron captar al autobús más pasajeros que al Metro, además otros factores que pudieron influir fueron la desaceleración de la económica y la disminución del turismo observados durante ese periodo.

### **c) Impactos en la economía**

El impacto del peaje urbano de Londres en los negocios en términos de empleo, número de empresas y volumen fue neutral. El sector comercial e inmobiliario tampoco se vio afectado. Según un estudio realizado por el “Imperial College” de Londres, el comercio minorista en el centro de Londres tampoco se vio afectado por la introducción de la tasa por congestión.

### **d) Impactos en los precios inmobiliarios**

Para identificar el impacto del peaje urbano de Londres sobre los precios de la propiedad inmobiliaria, *TfL* encargó dos estudios, uno sobre los precios de las propiedades comerciales y otro sobre los residenciales. El estudio de propiedad residencial comparó por tipos de propiedad (casa aislada, casa adosada, apartamento) y ubicación (dentro de la zona central del peaje (CZ), en la frontera del peaje y en el resto del Gran Londres) los precios y el volumen de transacciones de compra a lo largo del tiempo. El principal hallazgo en ese momento fue que el peaje urbano de Londres no había tenido un efecto estadísticamente significativo sobre los precios de las propiedades residenciales, en contra de lo que se hubiera esperado dados los beneficios de la reducción de la congestión y el importante descuento para sus residentes. Aunque según (Santos, G., Button, K., Noll, 2008) hubieron una serie de problemas con el estudio que pudieron haber originado resultados no del todo fiables. Primero, aunque el periodo de análisis se remontó hasta el año 1995 sólo se extendió hasta el primer trimestre de 2004 lo que hizo que apenas se incluyera un año del periodo de aplicación de la tasa por congestión. En segundo lugar, solo se utilizaron precios promedios y no individuales. En tercer lugar, no hubo un control sobre las características que podrían influir en el valor de una propiedad.

En cuanto a los precios inmobiliarios del sector comercial, se analizaron las tendencias de precios de los edificios de oficinas y minoristas dentro de la zona central del peaje. Los principales hallazgos fueron que antes de que se implementara la tasa por congestión, el crecimiento del alquiler en propiedades minoristas fue más lento que en el resto del “Inner London”. Sin embargo, después de la introducción de la tasa, los alquileres aumentaron más rápidamente dentro de la zona central (CZ) que en el resto del “Inner London”. (Santos, G., Button, K., Noll, 2008) indican que la conclusión de este suceso fue porque justo dentro de los bordes de la zona central (CZ), la demanda inmobiliaria era más débil que la que había en el anillo de 2 kilómetros que la rodeaba, y las empresas preferían ubicarse justo fuera y no dentro de la zona central (CZ) del peaje.

#### 4.3.4 La política en el peaje urbano de Londres

La ciudad de Londres planteó inicialmente un LCCS<sup>30</sup> que consistía en aplicar una tarifa fija, que no variaba ni con el tipo de vehículo ni con la hora de entrada del vehículo a la zona regulada, para todos aquellos automovilistas que accedían al centro de la ciudad. Este esquema tarifario no fue calculado en función de una base de cálculo sobre su coste marginal y no constituía, de partida, la mejor opción para la ciudad. Sin embargo, es un ejemplo de cómo una solución rápida y sencilla puede ser efectiva y además generar ingresos netos para la administración. La tarifa por congestión que inicialmente se consideró fue de 10 libras, aunque posteriormente debido a presiones políticas y para tener menores repercusiones sociales el alcalde de la ciudad acordó bajarla a 5 libras, después de comprobar que con la nueva tarifa reducida seguía consiguiendo reducciones de tráfico significativas.

Posteriormente, en julio del año 2005, el Ayuntamiento de Londres decidió aumentar a todos los vehículos la tasa por congestión desde las 5 a las 8 libras principalmente debido a las presiones recibidas por el sector del transporte, aunque hubo otros sectores de la ciudad que ejercieron una fuerte oposición. Este es un ejemplo de cómo la política puede influir en la configuración del precio de una tarifa por congestión en una ciudad a pesar de que desde un punto de vista técnico-económico el precio de la tasa debería ser igual al de su coste marginal.

Otro aspecto controvertido fue el establecimiento del horario de funcionamiento del peaje urbano de Londres. El grupo de expertos que formaron el (ROCOL, 2000) recomendó un horario de funcionamiento comprendido entre las 7:00h y las 19:00h. A pesar de esta recomendación, el horario de funcionamiento que finalmente se fijó fue comprendido entre las 7:00h y las 18:30h. Según el director del LCCS de *Transport for London*, Malcom Murray-Clark, la decisión de cambiar el horario de funcionamiento fue debida, principalmente, a la presión ejercida por la industria del entretenimiento que argumentó que aplicar la tasa por congestión hasta las 19:00h desalentaría al público a asistir al teatro.

Por otro lado, los límites exactos del “congestion charging” también fueron modificados en varias ocasiones, hasta acordarse el esquema final. Este hecho, nuevamente, fue debido a las presiones ejercidas por ciertos grupos de personas y empresas que querían beneficiarse de descuentos en la tarifa de hasta el 90% por temor a que el peaje urbano les hiciera sufrir pérdidas en sus negocios.

En cuanto a la tecnología que se utilizó en Londres para la implementación del peaje urbano, como ya se ha dicho, se seleccionó un sistema de cámaras para el reconocimiento de matrículas con tecnología ANPR como solución intermedia y factible entre un ineficiente sistema basado en papel y un sofisticado y costoso sistema electrónico de pago similar al aplicado en las carreteras.

---

<sup>30</sup> LCCS: “London Cogestion Charging Scheme” Esquema de tasa por congetion de Londres

A modo de resumen y en líneas generales podemos decir que las tres principales decisiones que se tomaron en Londres referentes al LCCS como fueron la tarifa de la tasa por congestión, su horario de funcionamiento del peaje y los límites exactos de peaje urbano se hicieron más bien desde un punto de vista político que técnico-económico. Estas decisiones no son triviales y necesitan de importantes estudios que las respalden.

A pesar de que la definición del peaje urbano de Londres tuvo una fuerte componente política se realizaron estudios que trataron de prever sus efectos. (Santos & Rojey, 2004) simularon peajes en cordón en diferentes ciudades inglesas descubriendo que, si el peaje se establece en un nivel muy diferente del óptimo, se pueden producir pérdidas de bienestar en lugar de ganancias. Con estos resultados es sorprendente que ciertos planificadores se basen en juicios políticos a la hora de implementar peajes. (A. D. May et al., 2002) informaron que los responsables del diseño del peaje por congestión de Londres intentaron evitar con sus diseños impactos adversos para ganar aceptación pública. Este sería el motivo por el que el cordón se colocó dentro del anillo de circunvalación y se utilizó una estructura tarifaria simple y uniforme con un precio suficientemente bajo para que fuera aceptado.

Podemos concluir indicando que una decisión tan importante como la de implementar una tasa por congestión en una ciudad no sólo debería tener en cuenta las decisiones políticas, fruto de la opinión de sus ciudadanos, sino que se debería apoyar en estudios rigurosos que traten de cuantificar el beneficio social neto que la medida provocaría en la ciudad. Hay que decir también que a pesar de todo el peaje urbano de Londres ha sido un éxito, hasta el punto que los londinenses reeligieron a su alcalde en el año 2003.

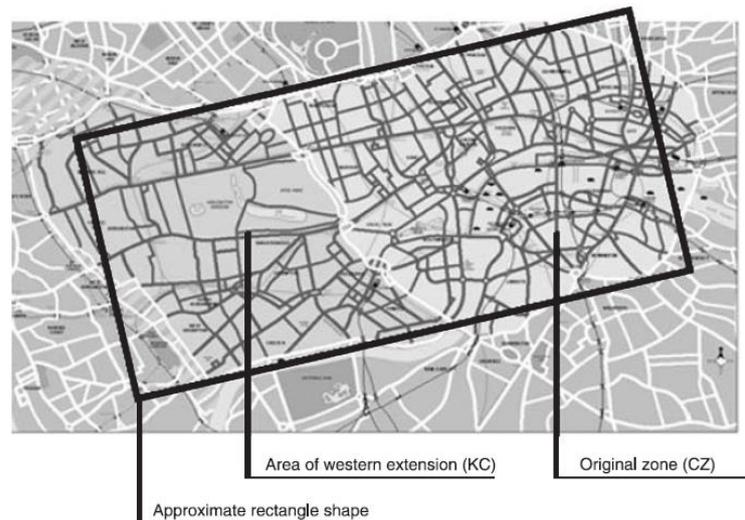
#### **4.3.1 La extensión oeste**

El 30 de septiembre del año 2005, el alcalde de Londres aprobó los planes para ampliar la zona original del peaje por congestión de Londres denominada (CZ). En agosto del año 2004 la “Greater London Authority<sup>31</sup>” publicó una revisión de la estrategia de transporte de la ciudad, así como una serie de consultas públicas sobre la magnitud de la extensión del peaje.

La propuesta de extensión de la zona original del peaje urbano de Londres se acordó hacerla hacia el oeste. La nueva extensión propuesta cubría todo el “Royal Borough of Kensington and Chelsea (KC)” junto con áreas de la ciudad de Westminster que no estaban cubiertas por el esquema original. En la Figura 18 se muestra la nueva propuesta de extensión del peaje urbano londinense.

---

<sup>31</sup> La Autoridad del Gran Londres (Greater London Authority en inglés) ("AGL", "GLA" en inglés) es la administración que gobierna la ciudad-región del Gran Londres, que abarca toda el área urbana de la capital del Reino Unido. La autoridad tiene dos órganos políticos: el Alcalde de Londres y la Asamblea de Londres, compuesta por 25 miembros. Tanto el alcalde como los miembros de la asamblea son escogidos en elecciones directas. La AGL tiene su sede en el City Hall, un vanguardista edificio en la orilla sur del río Támesis, junto al Tower Bridge.



**Figura 18. Mapa del área de ampliación propuesta del LCCS. Fuente: TfL (Transport for London).**

La propuesta de la extensión vino precedida por una consulta pública que fue publicada por la “Greater London Authority”. Los resultados de esta consulta mostraron, en general, una fuerte oposición a la medida al igual que lo hizo la consulta que se realizó para proponer la subida de la tasa por congestión desde las 5 libras a las 8 libras. El 70% de los ciudadanos y el 80% de las empresas se opusieron a la extensión. Sorprendentemente el 66% de los encuestados residentes en la zona original del peaje y el 72% de los residentes dentro del área ampliada se opusieron a la medida, a pesar de que en teoría la nueva situación les beneficiaba. Es posible que estos resultados se dieran por qué la administración no supo explicar bien los beneficios que obtendrían estos residentes en sus desplazamientos y la reducción de congestión que obtendrían en sus zonas de residencia.

Podemos decir que con la extensión del peaje urbano de Londres los mayores perdedores fueron aquellos residentes que vivían fuera del área delimitada por el peaje, realizaban viajes con origen o destino dentro del área tarifada y no tenían posibilidad de cambiar de ruta. La consulta reflejó que el 80% de estos ciudadanos se oponían a la extensión del peaje urbano de Londres.

Finalmente, el 19 de febrero de 2007 comenzó a funcionar la nueva zona extendida del peaje urbano de Londres con un funcionamiento casi idéntico al original. Los conductores de vehículos ligeros y pesados debían abonar 8 libras al día para ingresar en la nueva zona ampliada. En cuanto a los descuentos se aplicaban los mismos que los aplicados antes de la ampliación. Las horas de tarificación finalizaban a las 18:00h, en lugar de las 18:30h, y a partir de septiembre de 2006 se flexibilizó la liquidación de la tarifa permitiendo pagos hasta la medianoche del día siguiente después de que el vehículo ingresara en la zona de peaje.

Respecto a la política de descuentos se mantuvieron los mismos criterios que con la zona de peaje original. Todos los residentes que vivían dentro de la nueva área extendida tendrían derecho a una bonificación del 90% sobre la tarifa base. Posteriormente, este descuento se “extendería más allá de la zona de peaje”<sup>32</sup>.

### 4.3.2 La congestión en la zona central de Londres tras la extensión

La comúnmente denominada WEZ<sup>33</sup> del peaje urbano londinense no tuvo, en líneas generales, un impacto significativo en la congestión como se puede apreciar en la Figura 19. Podemos ver que ya desde el año 2006 se observó una tendencia creciente de la congestión en el área afectada por el peaje. Esta tendencia continuó a lo largo de los años 2007 y 2008 de manera que, durante este periodo, volvieron a recuperarse los niveles de congestión previos a la introducción del peaje urbano.

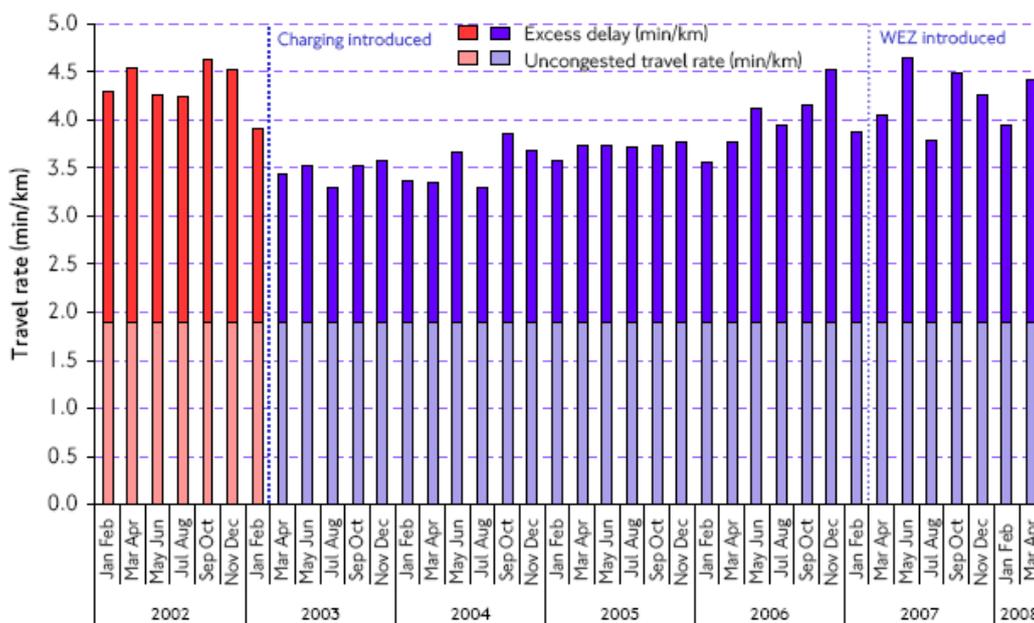


Figura 19. Congestión en la zona central del “congestion charging” de Londres. Fuente: TfL (Transport for London).

Por otro lado, a continuación, podemos ver en la tabla adjunta los ratios de exceso en los tiempos de viajes durante el periodo temporal 2002-2006. En esta tabla podemos volver a apreciar como durante los tres primeros años de funcionamiento del peaje urbano la congestión mejoró significativamente respecto a la situación previa al peaje, no obstante, a partir del año 2006 empeora progresivamente hasta situarse en 2007 y 2008 con valores idénticos a los obtenidos en el año 2002.

<sup>32</sup> Extender los descuentos más allá de la zona de peaje fue una decisión tomada fruto de una serie de consultas realizadas en 2004 sobre la revisión de la estrategia de transporte.

<sup>33</sup> WEZ: Western Extension Zone. El 19 de febrero de 2007 la zona original del peaje urbano de Londres se extendió al oeste de la ciudad aplicando las mismas condiciones tarifarias que en el esquema original. Sin embargo, las promesas políticas realizadas por el alcalde Boris Johnson, que sucedió a Ken Livingston artífice de la extensión oeste, hicieron que el 4 de enero del 2011 se retirara la aplicación de la tasa por congestión de la zona extendida.

Averaging period	Number of surveys	Mean excess travel rate (minutes per kilometre)	Difference 2002 representative value (%)
2002 calendar year – observed average	6	2.5	+ 8%
2002 calendar year – representative level	6	2.3	base
2003 post charging	5	1.6	- 30%
2004 post charging	6	1.6	- 30%
2005 post charging	6	1.8	- 22%
2006 post charging	6	2.1	- 8%
2007 post charging	6	2.3	0%
2008 January – April	2	2.3	0%

**Tabla 9. Comparativa de la congestión 2002-2008 en la zona central del peaje en Londres. Fuente: Transport for London.**

Una de las posibles causas que según *Transport for London* podrían hacer afectado a este aumento de la congestión producido a partir del año 2006 pudo ser la organización de los Juegos Olímpicos de Londres de 2012. Durante los años 2007 y 2008 coincidieron en la ciudad muchas obras públicas dirigidas a la celebración de los Juegos Olímpicos.

Como conclusiones finales de los efectos de la congestión generados por el peaje urbano de Londres en la ciudad podemos decir que, en general, mejoraron las previsiones realizadas por *Transport for London*. Por ejemplo, TfL había previsto reducir la congestión durante los años 2003 y 2004 entre un 20-30%, sin embargo, se lograron reducciones medias del 30%. Otra conclusión importante fue comprobar que el aumento desde las 5 libras hasta las 8 libras de la tasa de congestión en julio de 2005 no provocó impactos sustanciales en la congestión de la ciudad. Tampoco lo hizo la extensión oeste del área de peaje urbano.

### 4.3.3 La tasa por congestión y el medioambiente

La idea original de aplicar una tasa por congestión en Londres no tuvo unos objetivos medioambientales: su único objetivo era reducir el tráfico y la congestión en el centro de la ciudad. Sin embargo, se estimó que la reducción del número de vehículos y el aumento en la velocidad de circulación (que implica menos detenciones en la ruta) generó unas reducciones del 8% de las emisiones de óxido de nitrógeno, un 7% de las emisiones de partículas en suspensión y un 16% de las emisiones de dióxido de carbono. A pesar de ello estas reducciones no tuvieron efectos suficientemente importantes en la calidad del aire de la ciudad.

Podemos decir que las dos principales externalidades ambientales generadas por el transporte por carretera son el calentamiento global y la contaminación atmosférica, ambas están estrechamente relacionados con las emisiones de combustible, que a su vez están estrechamente relacionadas con el consumo de combustible (y, en el caso de la contaminación, con el tipo de vehículo). La forma más fácil y práctica de internalizar estos costes es imponer un impuesto al combustible. En el Reino Unido, los impuestos al combustible se complementan con impuestos especiales en función del tipo de vehículo según las emisiones que produce; por lo tanto, los vehículos diésel pagan un impuesto especial más alto que los vehículos de

gasolina porque son más contaminantes. (David M. Newbery, 1990) examina los costes ambientales del transporte por carretera en el Reino Unido y los compara con los impuestos de transporte. El autor concluye que los impuestos al transporte “parecen cubrir con creces los costes sociales y ambientales del transporte, así como el coste de proveer la infraestructura”.

Si los impuestos sobre el combustible son la forma más económica y efectiva de cobrar por las emisiones, y si estos en el Reino Unido ya cubren con creces todos los costos ambientales del transporte por carretera, en principio no sería necesario imponer ningún impuesto o tasa ambiental adicional a los conductores. Sin embargo, y aunque el peaje urbano de Londres no tuvo objetivos medioambientales cuando se concibió; posteriormente se hicieron propuestas para vincular la tasa por congestión a las emisiones generadas, lo que podríamos considerar como un doble cargo.

El proyecto propuesto que pretendía aplicar tasas por congestión en función de las emisiones generadas, se dirigía a vehículos con altas emisiones de dióxido de carbono. Los vehículos con altos niveles de emisiones (más de 225 gramos por kilómetro) pagarían 25 libras por acceder dentro de la zona central de Londres (CZ), mientras que los vehículos que cumplieran con los estándares Euro IV y con niveles más bajos de emisiones (hasta 120 gramos por kilómetro) optarían a descuentos del 100 por cien de la tarifa. Otros vehículos (con emisiones de 121 a 224 gramos por kilómetro) continuarían pagando 8 libras por el acceso. Los residentes con vehículos que emitieran más de 225 gramos de dióxido de carbono por kilómetro ya no podrían optar al descuento del 90 por ciento para residentes, y tendrían que pagar una tasa de 25 libras por acceso. Los residentes que condujeran vehículos con emisiones de hasta 120 gramos por kilómetro tendrían derecho a un descuento del 100 por cien, mientras que los residentes con vehículos con emisiones entre 121 y 224 gramos por kilómetro continuarían pagando la tarifa con un descuento del 90 por ciento.

Si tenemos en cuenta que, en el Reino Unido, una tonelada de dióxido de carbono se valora en aproximadamente en 20.45 libras (a precios y valores de 2005)<sup>34</sup>, significa que un vehículo que emite 225 gramos por kilómetro impone una externalidad de 0.46 peniques por kilómetro. Si se requiere que tal vehículo pague 25 libras por día por el privilegio de usar la zona central del peaje (CZ), incluso si condujera 1.000 kilómetros, impondría costes inferiores a las 5 libras. Por esto que carece de sentido aplicar nuevas tasas medioambientales. Independientemente de la eficiencia económica o ineficiencia de la tasa ambiental, la conciencia ambiental ha ido aumentando durante los últimos años, no sólo en el Reino Unido sino también en otras partes del mundo, hasta el punto de que se ha vuelto políticamente aceptable tomar medidas para reducir las emisiones de gases contaminantes en las ciudades. Londres no ha sido una

---

<sup>34</sup> (Evans, 2007) Esta cifra, a su vez, proviene de Clarkson y Deyes (2002), quienes revisaron prácticamente todos los estudios publicados (en ese momento) que intentaron asignar un valor al costo social de las emisiones de carbono. Concluyeron que el más sofisticado de los estudios publicados que revisaron produce una estimación de daño marginal de aproximadamente £ 70 / tn (tonelada de carbono) (precios de 2000) para las emisiones de carbono en 2000. Esto aumenta aproximadamente en £ 1 / tn por año en términos reales para cada año subsiguiente para dar cuenta del aumento de los costos de daños a lo largo del tiempo. Esta cifra fue tomada por el gobierno de los EE. UU. Y todavía se usó a partir de enero de 2008.

excepción como podemos comprobar en la siguiente tabla que muestra los principales impuestos circulatorios aplicados en la ciudad.

Esquema	Fecha inicio	Área afectada	Vehículos afectados	Clasificación vehicular	Horario	Tasa diaria
<b>Congestion Charge</b>	17/02/03	Central London	Triciclos y cuatriciclos de motor*, coches, furgonetas, camiones y vehículos especiales pesados	N/A	Lunes – Viernes 07:00 – 18:00 excepto festivos	£11.50 (£10.50 Auto Pay) (£14 si el pago de la tasa se hace al día siguiente)
<b>T-Charge</b> (oficialmente conocido como Emissions Surcharge). La ULEZ reemplaza el T-Charge en la zona central de Londres desde el 8 April 2019	23/10/17	Central London	Triciclos y cuatriciclos de motor *	Euro 3	Lunes – Viernes 07:00 – 18:00 excepto festivos	£10 si no se cumple con la clasificación vehicular
			Coches y pequeñas furgonetas	Euro 4		
			Furgonetas grandes y minibuses**	Euro 4		
			Autobuses, autocares y camiones and vehículos especiales pesados***	Euro 4		
<b>Ultra Low Emission Zone</b>	08/04/19	Central London	Motocicletas, triciclos y cuatriciclos a motor	Euro 3	Permanente	£12.50 si no se cumple con la clasificación vehicular
			Coches, vehículos privados de alquiler y pequeñas furgonetas	Gasolina Euro 4 Diesel Euro 6		
			Furgonetas grandes y minibuses**	Gasolina Euro 4 Diesel Euro 6		£100 si no se cumple con la clasificación vehicular
			Autobuses y autocares de más de 5 tn; camiones y vehículos pesados especializados de más de 3.5tn***	Euro 6		
<b>Low Emission Zone - current</b>	04/02/08	Greater London	Furgonetas grandes y minibuses**	Euro 3	Permanente	£100 si no se cumple con la clasificación vehicular
			Autobús, autocares, camiones y vehículos pesados especializados***	Euro 4		£200 si no se cumple con la clasificación vehicular
<b>Low Emission Zone</b>	26/10/20	Greater London	Furgonetas grandes y minibuses**	Euro 3	Permanente	£100 si no se cumple con la clasificación vehicular
			Autobuses y autocares de más de 5 tn; camiones y vehículos pesados especializados de más de 3.5tn***	Euro 6		£300 si no se cumple con Euro IV, £100 sino se cumple con Euro VI
<b>Ultra Low Emission Zone - expansion</b>	25/10/21	Expansión desde el centro de Londres hasta el norte y sur de la carretera circular	Motocicletas, triciclos y cuatriciclos a motor	Euro 3	Permanente	£12.50 si no se cumple con la clasificación vehicular
			Coches, vehículos privados de alquiler y pequeñas furgonetas	Gasolina Euro 4 Diesel Euro 6		

\*Vehículos a motor de 3 o 4 ruedas de más de un metro de ancho o 2 metros de largo.

\*\*Furgonetas y minibuses, caravanas, remolques motorizados, vehículos de asistencia, ambulancias privadas, coches fúnebres, vehículos adaptados para el transporte de pasajeros y mercancías y otros tipos de vehículos que se ajusten a los criterios de pesos. Furgonetas (de más de 1.200 kg sin carga y menos de 3.500kg de peso bruto) y minibuses (vehículos de pasajeros de más de ocho asientos incluyendo el conductor que no excedan de 5.000 kg de peso bruto).

\*\*\*Camiones, caravanas, remolques motorizados, vehículos de asistencia, quitanieves, vehículos de recogida de basura, barredoras, camiones hormigoneras, camiones de bomberos, volquetes, camiones de mudanzas, otros vehículos especiales que superen los 3.500 kg de peso bruto. Autobuses y autocares de pasajeros con más de ocho asientos, incluyendo el conductor, que superen los 5.000 kg de peso bruto.

**Tabla 10. Esquemas tarifarios vehiculares aplicados en Londres. Fuente: <http://urbanaccessregulations.eu/>.**

#### 4.3.4 Costes ingresos y beneficios del peaje urbano de Londres

Los costes originales del proyecto del LCCS fueron de aproximadamente 200 millones de libras en el año 2002, la mayoría de los cuales fueron financiados por el Gobierno Central (Santos, G., Button, K., Noll, 2008). En cuanto a los costes derivados de la extensión oeste del peaje estuvieron entre los 113 y los 118 millones de libras y fueron financiados en este caso por *Transport for London*. La Tabla 11 muestra los costes e ingresos del peaje urbano de Londres durante el periodo 2002-2006. Como podemos observar en la tabla, excepto para el ejercicio contable del periodo 2002-2003 el resto de ejercicio presentan una proporción de costes frente a ingresos del orden del 50 por ciento.

**Table 1. Annual Costs and Revenues of the LCC Project<sup>a</sup>**

2005 pounds (millions)

<i>Costs and revenues</i>	2002-03	2003-04	2004-05	2005-06	2006-07
Total operating costs	18	98	92	88	88
Total revenues	20	179	197	210	208
Charge revenues	19	122	120	144	154
Enforcement revenues	1	58	77	66	54
Net revenues	2	82	105	122	120

Sources: Columns 1 through 4: TfL (2006a, table A, p. 5); column 5: TfL (2007b, table 6.2, p.114), converted to 2005 values and prices using the GDP deflator from the U.K. Treasury website ([http://www.hm-treasury.gov.uk/economic\\_data\\_and\\_tools/gdp\\_deflators/data\\_gdp\\_fig.cfm](http://www.hm-treasury.gov.uk/economic_data_and_tools/gdp_deflators/data_gdp_fig.cfm))

a. For the financial year 2006-07, figures for the extended zone are provided and therefore include an element of contribution from the Western extension, both in terms of discounted resident payments from October 2006 and charges from February 19, 2007. In a full financial year, it is expected that net revenues will increase by up to £40 million per year more than the amount of pre-extension revenues (TfL, 2007b, p. 113).

**Tabla 11. Costes y beneficios anuales del proyecto LCCS (London Congestion Charging Scheme). Fuente: (Santos, G., Button, K., Noll, 2008).**

“The Greater London Authority” aprobó en el año 1999 una ley por la cual se estipulaba que los ingresos netos generados por los proyectos de peajes viarios debían revertir durante los primeros 10 años de legislación en proyectos de infraestructuras de transporte. En la Tabla 12 podemos ver la asignación de ingresos netos del peaje urbano de Londres desde su funcionamiento.

**Table 2. Use of Net Revenues from LCC**

2005 pounds (millions)

<i>Revenue source</i>	2003-04	2004-05	2005-06	2006-07
Bus network operations	66	84	100	99
Roads and bridges	13	11	14	14
Road safety	0	2	4	5
Walking and cycling	6	6	4	3
Distribution of freight	2	1	0	0

Sources: Column 1: Greater London Authority (2004, table 12, p. 51); column 2: TfL (2005b, figure 94, p. 139); column 3: TfL (2006b, table 9.4, p. 174); column 4: TfL (2007b, table 6.3, p. 114). All values were converted to 2005 values and prices using the GDP deflator from the U.K. Treasury.

**Tabla 12. Uso de los ingresos netos del proyecto LCCS (London Congestion Charging Scheme). Fuente: (Santos, G., Button, K., Noll, 2008).**

El peaje urbano de Londres recaudo 78 millones de libras en el periodo 2003-2004, menos de los 120 millones de libras que se habían estimado. Las mejoras de transporte en Londres durante ese periodo se estimaron en 82.8 millones de libras. El déficit generado se cubrió con fondos que provenían de otras

fuentes como el del aumento de ingresos del transporte público. *Transport for London* enumera una serie de razones que pretenden explicar los bajos ingresos finalmente obtenidos por el peaje:

- El número real de vehículos que ingresaron en el área de peaje fue inferior al que dieron los modelos de transporte debido a que la reducción del tráfico que se produjo fue superior a la estimada.
- El número de vehículos con exenciones o descuentos tarifarios fue superior al previsto.
- El número de vehículos comercial que utilizó el peaje fue también inferior al previsto.
- Se produjo una evasión de vehículos de la zona de peaje superior a la esperada.

Los ingresos netos obtenidos por el peaje urbano de Londres fueron utilizados por el alcalde de la ciudad para realizar una serie de políticas orientadas a mejorar el transporte público de la ciudad. El programa de mejoras incluía mejorar el servicio y la accesibilidad del sistema de autobuses, mejorar los intercambiadores modales de transporte, desarrollar nuevos tranvías y carriles de autobuses segregados y mejorar la seguridad viaria y ciudadana. El hecho de emplear los beneficios obtenidos por el peaje en mejoras del sistema de transporte de la ciudad contribuyó a aumentar la aceptabilidad ciudadana del peaje urbano de Londres.

Por otro lado, el ahorro de los tiempos de viajes que experimentaron los usuarios con la introducción de la tasa por congestión en Londres fue otro de los principales beneficios del sistema. *Transport for London* estimó que el ahorro de tiempo de los viajes conseguidos en la zona de peaje representó un valor económico de 227 millones de libras anuales para la ciudad (dentro de este cálculo no se incluyó el impacto de la ampliación oeste). Además, existen otras mejoras, aunque menos significativas como el ahorro en combustible y mantenimiento de vehículos, reducción de accidentes y beneficios ambientales.

#### **4.3.5 Ganadores y perdedores**

Los peajes, en general, son un instrumento económico que aumentan la eficiencia de las infraestructuras y proporcionan ingresos al Estado, la contrapartida es que sus usuarios se ven perjudicados al tener que pagar una tasa por el uso de las mismas. El peaje urbano de Londres no es una excepción. En el caso de Londres había aproximadamente un 10% de personas que accedían en automóvil al centro de la ciudad en hora punta, podemos decir que en el peor de los escenarios esos fueron los grandes “perdedores” por haber sufrido los impactos negativos de la tasa. Existen tres motivos por los que probablemente esto no fue así. Primero, algunos de esos conductores eran discapacitados y estaban exentos del pago de la tasa. En segundo lugar, según (Evans, 2007) el 40% del total de viajes que accedían a la zona central (CZ) de Londres eran de negocios, con un alto valor del tiempo, lo que les obligaba a pagar la tasa por congestión. En tercer lugar, además de los viajes de negocio existían un número importante de viajes con un alto valor del tiempo.

(Santos & Bhakar, 2006) estimaron que el ingreso mínimo requerido de un viajero para que se beneficiara de la tasa por congestión de 5 libras era de 1.400 libras por semana, una cifra basada en el supuesto de que

el valor del tiempo del viaje era menor en condiciones no congestionadas que en congestionadas. Unos ingresos semanales de 1.400 libras equivalían, aproximadamente, a un salario anual de algo menos de 75,000 libras. Dado que, de media, el 10% de los trabajadores más ricos de Londres ganaban más de 65.835 libras anuales (según datos de la oficina de estadística nacional del Reino Unido en el año 2004), no es descabellado pensar que un número considerable de automovilistas se beneficiaron de la tasa por congestión de 5 libras.

Utilizando la misma metodología reportada por Santos y Bhakar (2006), pero ahora asumiendo una tasa por congestión para el peaje de Londres de 8£ en lugar de 5£, los ingresos mínimos semanales para que un conductor se beneficiara del peaje urbano aumentarían hasta las 2.348 libras semanales, que equivaldría aproximadamente a un salario anual de 122.000 libras. Este incremento en la tarifa, reduciría el número de personas que se beneficiarían de la tasa por congestión. Por tanto, nos podemos preguntar ¿quiénes son realmente los ganadores del peaje urbano? Pues, probablemente el 90% de los viajeros que, previamente al funcionamiento del peaje, utilizaban ya el transporte público o un medio de transporte no afectado por la tasa por congestión. Este colectivo, que no tuvo que pagar la tasa, ni cambiar de modo de transporte, horario o destino fue el que realmente se benefició de los menores tiempos de viaje y de la mejora en la calidad ambiental de la ciudad.

Dentro de la ciudad de Londres, además de los viajes en vehículos privado, estaban los viajes en vehículos comerciales del sector transporte. Estos últimos presentaban una problemática diferente a los primeros. El sector transporte tenía fuertes compromisos con sus clientes para cumplir con los tiempos de entrega de su mercancía, lo que hacía que su demanda fuera inelástica. Según los datos de tráfico publicados por *TfL* en el año 2003, el número de furgonetas y camiones de reparto que ingresaron en la zona central (CZ) del peaje urbano de Londres durante sus horas de funcionamiento fue solo un 11% inferior a la situación previa a introducción de la tasa. Esto demuestra la inelasticidad de su demanda.

(Santos, 2007) demostró que entre los años 2002 y 2003 los costes generalizados de los viajes en camiones de reparto y furgonetas en la ciudad de Londres aumentaron en casi 18 peniques por kilómetro, a pesar de haber considerado en sus estudios el beneficio que generó el peaje urbano en los ahorros de tiempo de viaje, que hicieron mejorar el cumplimiento de los horarios de entrega de la mercancía. Durante los siguientes años, los costes de estos viajes siguieron en aumento y marcaron un nuevo máximo en el año 2006. En este año, en el que la tasa por congestión era de 8 libras y ya existía un empeoramiento en las velocidades medias de circulación en la ciudad respecto años anteriores, los costos generalizados en estos viajes aumentaron hasta los 32 peniques por kilómetro. Sin duda, el sector del transporte en Londres sufrió impactos netos negativos por la puesta en funcionamiento del peaje que fueron empeorando con el paso del tiempo. En el año 2007, la Asociación de Transporte de Mercancías del Reino Unido recordó que siempre se opusieron a que los operadores comerciales estuvieran gravados para entrar al centro de Londres con la tasa por congestión, debido a que no pueden transferir el incremento del coste del peaje a sus clientes “los vehículos

de reparto son vehículos esenciales que son requeridos por sus clientes para hacer entregas y no existen otras alternativas disponibles”.

#### 4.3.6 Conclusiones

Después de haber analizado el impacto que ha tenido en la ciudad de Londres el peaje urbano podemos concluir que, por lo general, ha sido un éxito. De él se pueden extraer lecciones y experiencias para que otras ciudades, que estén valorando la aplicación de una medida como la tasa por congestión, las puedan considerar. A continuación, pasamos a resumir alguna de ellas:

- *Impacto sobre la movilidad.* La tasa por congestión de Londres logró reducir un 34% los veh-km en automóvil el primer año de operación y un 37% durante el periodo 2002-2006. Además, logró reducir la congestión, de media, un 30%. Por otro lado, hizo aumentar durante sus primeros años de funcionamiento la velocidad comercial de los autobuses urbanos y redujo los accidentes de tráfico en 40-70 víctimas anuales. Otra de las mejoras que logró fue la de reducir los niveles de gases contaminantes en la ciudad, un 13% los NO<sub>x</sub> y un 16% las PM<sub>10</sub>.
- *Información y participación ciudadana.* Antes de implementar la tasa por congestión en Londres se realizaron dos consultas públicas. Los resultados de estas encuestas influyeron en la configuración final de los límites de la zona de peaje, así como de la tarifa y horarios de funcionamiento del peaje urbano. Posteriormente a la confirmación final del esquema de peaje, el alcalde de Londres envió tres millones de folletos informativos donde se explicaba a los ciudadanos su funcionamiento y como debían actuar. La información también fue transmitida en televisión, radio y periódicos y se abrió una web. Todas estas medidas dieron una gran difusión de la actuación y permitieron la participación ciudadana.
- *Solución final no vinculada a un referéndum.* El alcalde de Londres desde los inicios fue partidario de introducir una tasa por congestión en la ciudad e incluso la convirtió en una parte central de su campaña electoral de mayo del año 2000. Él hizo posible la realización de diferentes consultas, pero nunca tomó la decisión final de introducir la tasa sujeta a ningún referéndum. Por el contrario, en la ciudad de Edimburgo en Escocia, donde también se había contemplado desde el año 2001 introducir una tasa por congestión similar a la de Londres, se tomó la decisión de realizar un referéndum para aprobar la propuesta. El resultado fue que el 74% de los residentes de la ciudad que participaron en el referéndum<sup>35</sup> votaron “no” y los planes fueron abandonados. Aunque el alcalde de Londres fue elegido llevando en su programa electoral la promesa de introducir una tasa

---

<sup>35</sup> Más del 60% de los ciudadanos con derecho a voto participaron en el referéndum celebrado del 7 al 21 de febrero de 2005, por lo que fue un éxito en términos de participación.

por congestión en Londres no es seguro que se hubiera aprobado de haberse consultado en un referéndum.

- *Realización de un cuidadoso análisis coste-beneficio.* En Londres se evaluaron diferentes propuestas de peaje urbano con sus correspondientes análisis de coste-beneficio. La dificultad del estudio radicó en el cálculo de las elasticidades, puesto que antes de implementar el esquema tarifario no se tenían datos reales de cómo iban a responder los conductores a la medida. La rigurosidad del estudio ACB es básica para poder predecir, en la medida de lo posible, la viabilidad o no de la medida.
- *Realización cuidadosa de una evaluación de los efectos distributivos.* Esta evaluación debe concentrarse sobre quién ganará y quien perderá con la aplicación de la tasa por congestión. Esto dependerá, evidentemente, del diseño que se haga del peaje y de las características que tenga la ciudad. También dependerá de la disponibilidad de medios de transporte no sujetos al peaje urbano (transporte público, carriles bicicleta, entre otros).
- *Consideración de las características geográficas de la ciudad.* Aunque la implementación de una tasa por congestión puede funcionar en ciudades densas y congestionadas en sus centros, puede que no funcione en ciudades que tengan otro tipo de congestión más difusa. Las ciudades que sólo sufran congestión en sus vías principales, es posible que una medida orientada a tarificar sólo las vías congestionadas sea más efectiva.
- No es necesario vincular el precio de la tasa por congestión al cálculo de los costes marginales<sup>36</sup>, *Transport for London* ni siquiera los estimó para el caso de Londres.

#### **4.4 El caso de Estocolmo. El éxito de su prueba piloto**

Durante mucho tiempo, planificadores de tráfico y economistas especializados en transporte han defendido los peajes urbanos como una solución eficaz para reducir la congestión en las ciudades. Singapur fue la primera ciudad en el mundo que los aplicó, sin embargo, durante los últimos años los peajes urbanos se han implantado en otras ciudades, como Londres o Estocolmo, con ambiciosas áreas de congestión que envuelven todo el núcleo urbano de la ciudad.

En el presente apartado, con la ayuda de los estudios llevados a cabo por (Eliasson, 2009), analizaremos el caso del peaje urbano de Estocolmo que es interesante por varias razones. La primera para ver los efectos que la introducción de la tasa por congestión tuvo en el tráfico de la ciudad. La segunda, incluso más interesante que la primera, para ver el complicado proceso político y jurídico al que fue sometido la medida

---

<sup>36</sup> La tarificación a coste marginal de una carretera consiste en hacer que el usuario pague únicamente los costes marginales que ocasiona con su circulación. Este tipo de tarifa es la más eficiente desde un punto de vista económico, y con ella se alcanza el máximo bienestar social. Este punto óptimo se alcanza cuando el precio hace que cada usuario perciba el coste marginal de acceder a la infraestructura. Esto es, el usuario solamente paga por el coste adicional ocasionado que no internaliza (Izquierdo y Vassallo, 2001).

que derivó incluso en la celebración de un referéndum defendido desde el principio por los opositores al peaje urbano.

#### **4.4.1 Breve historia del proceso político**

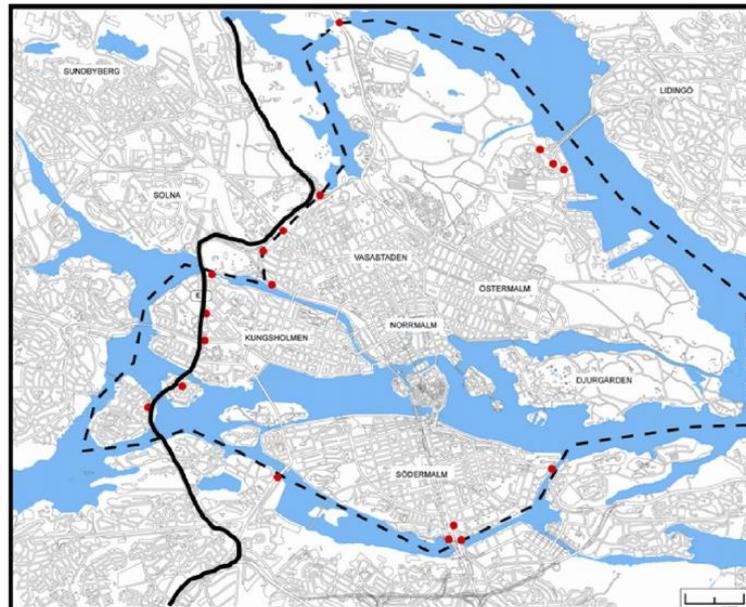
Las elecciones de Estocolmo del año 2002, tanto a nivel nacional como en la ciudad de Estocolmo, dieron lugar a la victoria del gobierno social-demócrata ayudado por el respaldo político de los partidos verdes y de izquierdas. Pero como contrapartida a ese apoyo, el partido de los verdes pidió la implementación de una prueba piloto de un peaje urbano por el cual se debía aplicar una tasa por congestión a todos aquellos vehículos que accedían al centro de la ciudad de Estocolmo. Inicialmente la líder social demócrata, Annika Billström, prometió que nunca se aplicaría la medida en la ciudad, pero finalmente y para no poner en riesgo el gobierno, aceptó aplicarla durante un periodo de prueba. A partir de ahí se generó un importante debate por el que se pretendía decidir la permanencia o no de la tasa por congestión fuera de ese periodo de pruebas.

Por diferentes razones, asociadas a temas legales y tecnológicos, el periodo de prueba del peaje urbano en Estocolmo se vio considerablemente reducido frente a las propuestas iniciales. Finalmente, la prueba piloto se aplicó entre el 3 de enero de 2006 y el 31 de julio de 2006. Posteriormente, se planteó si el peaje urbano se debía completar con un proyecto de extensión de la red de transporte público de la ciudad con nuevas líneas de autobuses, aumento de la capacidad de los modos ferroviarios (ferrocarril y metro) y construcción de nuevas instalaciones de “park-and-ride”.

El periodo de prueba del peaje urbanos en Estocolmo fue seguido de un referéndum que coincidió con las elecciones del año 2006. La consulta del referéndum fue realizada tanto en la ciudad de Estocolmo como en los municipios colindantes. El resultado de la consulta en la ciudad de Estocolmo fue a favor de mantener la tasa por congestión, aunque si añadimos los resultados del conjunto de los municipios colindantes el resultado fue en contra. Finalmente, el nuevo gobierno liberal-conservador decidió reintroducir la tasa por congestión en agosto de 2007, asignando los beneficios que generase el sistema de peaje urbano a inversiones en infraestructuras de transporte y tráfico.

#### **4.4.2 El diseño del sistema**

El diseño del sistema del peaje urbano de Estocolmo que finalmente se acordó consistía en un cordón, alrededor de la zona central de la ciudad, por el cual todos los vehículos que lo cruzaban debían pagar una tasa. La tarifa era diferente según el horario de acceso al interior de la ciudad. El área interior del cordón tenía una superficie de alrededor 30 Km<sup>2</sup> (ver Figura 20). La zona contaba con poco menos de 300.000 habitantes, de los cuales 60.000 trabajaban fuera de la zona de peaje, y generaba cerca de 23.000 puestos de trabajo que empleaban aproximadamente a 318.000 personas.



**Figura 20. Área tarifada. La línea discontinua es el cordón de peaje. Los puntos rojos son los puntos de cobro y la línea continua es el “Essinge by pass” libre de peaje. Fuente: (Eliasson, Hultkrantz, Nerhagen, & Rosqvist, 2009).**

El coste de cruzar el cordón se fijó en 10, 15 ó 20 SEK<sup>37</sup> (1 € es algo menos de 10 SEK) dependiendo de la hora del día que se cruzaba (ver Tabla 13), con un máximo de 60 SEK por vehículo y día. El coste era el mismo en ambas direcciones. Durante la noche o periodos vacacionales la tasa por congestión no se aplicaba. Se desarrolló una política de exenciones que hizo que alrededor del 30% de los viajes que cruzaban el cordón estuvieran exentos del cargo. Por ejemplo, algunos de los modos de transporte que estaban exentos de la tarifa fueron los autobuses, vehículos con combustibles alternativos e incluso aquellos viajes que se producían entre la isla de Lidingö y el resto del continente. También se dejaron exentos aquellos vehículos que cruzaban Estocolmo por la E4/E20 “the Essinge by pass”<sup>38</sup>. “The Essinge by pass” tenía una gran cantidad de tráfico incluso antes de aplicar la tasa por congestión, lo que daba argumentos sólidos para aplicarla y descongestionar el vial, no obstante, la fuerte oposición de los residentes de los municipios colindantes a la ciudad de Estocolmo hizo que los políticos decidieran finalmente no implantarla.

6:30–7:00	10 SEK
7:00–7:30	15 SEK
7:30–8:30	20 SEK
8:30–9:00	15 SEK
9:00–15:30	10 SEK
15:30–16:00	15 SEK
16:00–17:30	20 SEK
17:30–18:00	15 SEK
18:00–18:30	10 SEK

**Tabla 13. Tarifas en los diferentes tramos horarios (solamente días laborales). Fuente: (Eliasson et al., 2009).**

<sup>37</sup> SEK: corona sueca. Valor 2015 (1 SEK=0.1071 euros)

<sup>38</sup> The Essinge by pass era la única vía libre de peaje que se utilizaba para ir del Sur al Norte del continente.

### El proceso de diseño

El objetivo del esquema de peaje urbano de Estocolmo era reducir la congestión en los viales más congestionados de la ciudad, mejorando la velocidad en los cuellos de botella. Este objetivo se cuantificó en una reducción entre un 10-15% del volumen de tráfico de los vehículos que cruzaban el cordón. Durante el proceso de diseño del peaje se utilizaron diferentes modelos de transporte que trataron de predecir el escenario futuro de tráfico y calcular la tasa de peaje óptima que conseguía una velocidad de circulación fluida en la ciudad. Estos modelos podían dar unos resultados más o menos fiable sobre el porcentaje de reducción del volumen de tráfico, pero saber con exactitud las velocidades de desplazamiento finales era otra cosa.

La maximización del excedente social del proyecto fue otro de los objetivos perseguidos a la hora de diseñar el peaje urbano. Esta tarea tampoco fue sencilla puesto que el modelo estático de tráfico, que se utilizaba para predecir los tiempos de viaje, generaba unos resultados que se consideraban que no eran del todo fiable debido a las altas tasas de congestión que se producían en algunas zonas de la ciudad. Puesto que el objetivo principal del peaje era aumentar la velocidad de circulación en los principales cuellos de botella de la ciudad, sobre todo en los cercanos al cordón, finalmente se utilizaron para su diseño los niveles de congestión en esos puntos. Tras la puesta en funcionamiento de la tasa por congestión en Estocolmo se pudo comprobar que las mejoras de las velocidades de circulación en los cuellos de botella que predijo el modelo fueron inferiores a la realidad, sin embargo, aguas arriba de los cuellos se obtuvieron velocidades superiores en la realidad a las predichas por el modelo. En la siguiente figura se pueden ver los resultados.

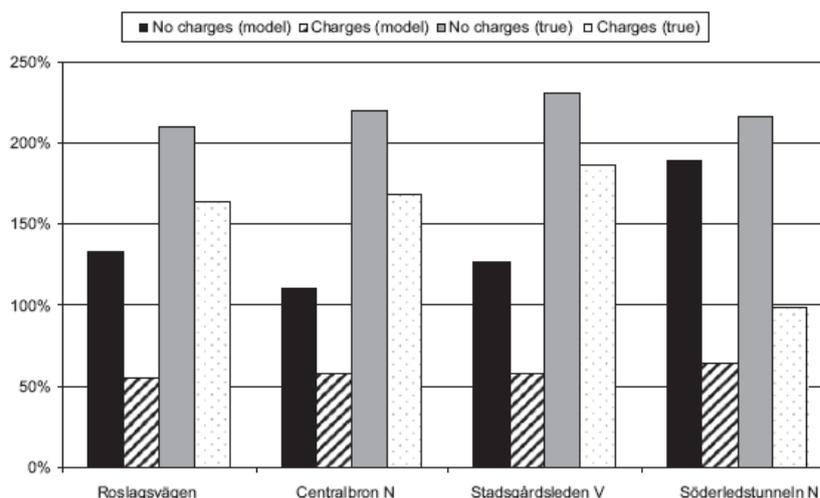


Figura 21. Incremento en el tiempo de viaje en cuatro importantes cuellos de botella de Estocolmo (comparación del modelo con la situación real). Fuente: (Eliasson, 2009).

Aparentemente, el modelo estático de red sobreestimó la mejora de velocidad en los cuellos de botella, a pesar de ello, en general, hubo una correcta correspondencia entre el modelo predictivo y los resultados reales.

Los diseñadores del peaje urbano de Estocolmo pretendieron en todo momento que el esquema implantado fuera de fácil comprensión de cara a los usuarios. Según (Bonsall, Shires, Maule, Matthews, & Beale, 2007) existe un importante conflicto entre hacer la tasa por congestión “eficiente” y fácilmente entendible. En el caso de Estocolmo se decidió hacerla fácilmente entendible. Por ello, se diseñó un sistema simétrico con idénticas tarifas entre los diferentes puntos de entrada y direcciones, y entre la mañana y la tarde.

Una consecuencia del diseño del cordón de peaje urbano en Estocolmo es que hizo aumentar la congestión fuera del cordón, este efecto hizo que se abandonaran ideas como la de implantar otro cordón interior.

Del proceso de diseño del peaje urbano de Estocolmo podemos sacar ciertas lecciones, una de ellas es la importancia de tener un buen modelo predictivo de transporte que nos debe ayudar a predecir el escenario futuro de tráfico tras la introducción de la tasa, este hecho es muy importante a la hora de realizar un buen diseño tarifario (este punto fue desarrollado por May et al., 2002).

### ***La elección de la tecnología***

La tecnología aplicada en el peaje urbano de Estocolmo consistió en la instalación de una serie de cámaras capaces de reconocer el número de matrícula de los vehículos que atravesaban el cordón. Durante el periodo de prueba, además la identificación del vehículo se realizó mediante transpondedores “OBU-TAG” que funcionaban mediante comunicaciones dedicadas de corto alcance DSRC<sup>39</sup>. Cuando finalizó el periodo de pruebas y se reintrodujo nuevamente el peaje en la ciudad, la identificación automática de matrículas mediante cámaras funcionó tan bien que se decidió suprimir los transpondedores y dejar sólo las cámaras. En cuanto al sistema de pago, hasta octubre de 2008, el 80% se realizaba mediante domiciliaciones bancarias y el resto se hacía en tiendas tipo (7eleven, etc.).

---

<sup>39</sup> DSRC” Dedicated short-range communications” son comunicaciones de corto y medio alcance diseñadas especialmente para su uso con vehículos. Un ejemplo del uso de estas comunicaciones es en los dispositivos de abordo (OBU) o comúnmente denominados Tag’s utilizados para el pago electrónico de peajes.

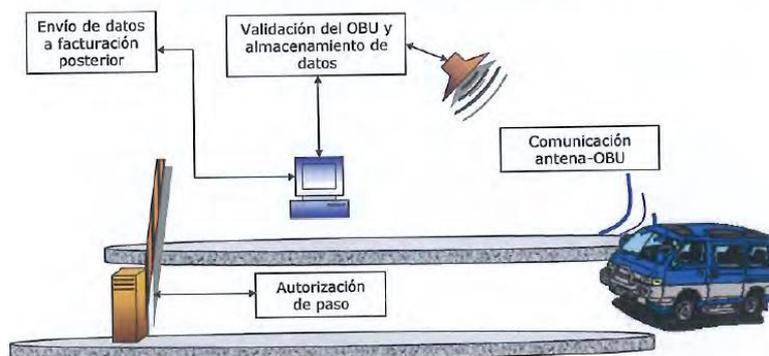


Figura 22. Telepeaje con comunicaciones DSRC. Fuente: (Salas Rondón, 2008).

Una de las principales diferencias técnicas del sistema de peaje de Estocolmo respecto al sistema de Londres fue que la responsabilidad del correcto pago de la tasa era del conductor y el sistema se dedicaba meramente a chequear por video que vehículos entraban en la zona de peaje. En Estocolmo, el sistema identifica y registra un pago una vez el vehículo está previamente registrado, si el vehículo no está registrado no es posible identificarlo y no hay posibilidad de realizar el pago. En Londres, sin embargo, existe un sistema de cámaras capaz de sancionar aquellos viajeros que no han realizado el pago de la tasa.

### ***La excepción en Lidingö***

Lidingö es una isla situada al noreste de la ciudad de Estocolmo, con una población de unos 31.561 habitantes en 2010, la cual solamente tiene conexión con el resto de Suecia a través puente de Lidingö. Esta situación geográfica hacía que, con la introducción de la tasa por congestión de Estocolmo, los ciudadanos de la isla que querían salir en coche del archipiélago tuvieran que pagar una doble imposición por cada viaje. Las alternativas en transporte público que tenían estos viajeros eran muy limitadas y aquellos que querían ahorrarse el peaje se enfrentaban a importantes incrementos de su tiempo de viaje. Este problema fue resuelto por las autoridades con la creación de la “excepción Lidingö”. Todo el tráfico hacia o desde Lidingö estaba exento de la tasa por congestión (siempre y cuando el tráfico de paso hacia el centro de Estocolmo fuera de menos de 30 min).

El principal problema de la “excepción de Lidingö” vino después. La solución para poner en práctica esta exención era complicada y fue necesario identificar el tráfico de paso para verificar que ningún vehículo, que estaban exento de la tasa, fuera accidentalmente multado al cruzar de un sitio a otro. La resolución técnica de este problema incremento considerablemente los costes de operación del peaje urbano de Estocolmo.

### ***La extensión del transporte público***

Para justificar políticamente la implantación del peaje urbano de Estocolmo se propuso una extensión de la red de transporte público de la ciudad para tratar de incrementar su demanda de uso. El coste de esta

extensión fue de alrededor 1400 MSEK que representó algo menos de la mitad del coste total del sistema de peaje urbano de Estocolmo valorado en unos 2000 MSEK. La mayor parte del coste de la extensión cubrió la compra de casi 200 nuevos autobuses (alrededor de 580 MSEK) además de la operación de 16 nuevas líneas de autobuses durante año y medio (alrededor de 570 MSEK). Las nuevas líneas de autobuses proporcionaban una alternativa eficiente para viajar en las horas punta desde los municipios colindantes al centro de la ciudad de Estocolmo. El resto del presupuesto se empleó para reforzar las líneas existentes de autobuses, metro y trenes de cercanía, así como para la construcción de un nuevo “park-and-ride”. (Kottenhoff & Brundell Freij, 2009) realizaron un análisis detallado de la extensión del transporte público de Estocolmo.

Las autoridades suecas del transporte realizaron varias encuestas para estimar el número de viajeros que, tras la extensión de la red de transporte público, serían transferidos desde el vehículo privado hacia el nuevo servicio de transporte colectivo. Los resultados de estas encuestas reflejaron que ciertos conductores del vehículo privado se planteaban cambiar hacia modos de transporte público. No obstante, los resultados de estas encuestas se dieron finalmente por incongruentes pues, durante el periodo de su realización, se produjo un aumento en el precio del combustible que pudo desvirtuar los resultados obtenidos.

La extensión de la red de transporte público en Estocolmo perseguía ciertos objetivos. El primero era proporcionar capacidad adicional al sistema transporte de la ciudad, aunque finalmente se demostró que la nueva capacidad proyectada fue insuficiente. La extensión de la red sólo consiguió captar 1400 viajes adicionales frente a los más de un millón de viajes diarios que se realizaban en transporte público alrededor del cordón. El segundo objetivo era amplificar el efecto que debía provocar la tasa por congestión, de tal manera que facilitara la interconexión entre el coche y el transporte público. Sin embargo, a partir de las encuestas que se realizaron en los autobuses urbanos se pudo comprobar que muy pocos viajeros provenían del vehículo privado. *De la reducción del 22% del tráfico de vehículos privados en el cordón de peaje, al menos un 0,1% puede ser atribuido a la extensión del transporte público (Eliasson, 2009).*

#### **4.4.3 Efectos del peaje urbano**

Los estudios relativos a la evaluación de los efectos del peaje urbano en Estocolmo se basaron en la comparación de las mediciones de tráfico tomadas en el año 2005 (antes de la aplicación del peaje) con las tomadas en el año 2006 (tras la aplicación del peaje). Una de las cuestiones principales fue saber si la variación de ese tráfico también se vio afectada por otros factores diferentes al peaje como cambios en el precio del combustible, empleo, población y adquisición de nuevos automóviles.

Como se puede observar en la Figura 23, hasta comienzos del año 1990 el volumen de tráfico a través del cordón solía incrementarse al mismo ritmo que lo hacía el tráfico en la región de Estocolmo. Sin embargo, a partir de 1990 se observa que mientras el tráfico en la región de Estocolmo seguía aumentando, a través del cordón permaneció contenido. Una posible explicación de este suceso pudo ser simplemente que el

cordón alcanzó su capacidad vial. Durante los siguientes 15 años, el tráfico a través del cordón permaneció sorprendentemente estable, a pesar de los cambios significativos producidos en los niveles de empleo, precio de combustible o adquisición de nuevos vehículos. Además, en la figura adjunta podemos observar una serie de hitos importantes donde se aprecian variaciones en el volumen de tráfico alrededor del cordón. Uno en el año 2004 motivado por la apertura del “Southern link”<sup>40</sup>, otro a principios del año 2006 por el efecto de la introducción “en pruebas” del peaje urbano y su supresión en julio de 2006, y finalmente otro en el año 2007 por la reintroducción de la tasa por congestión.

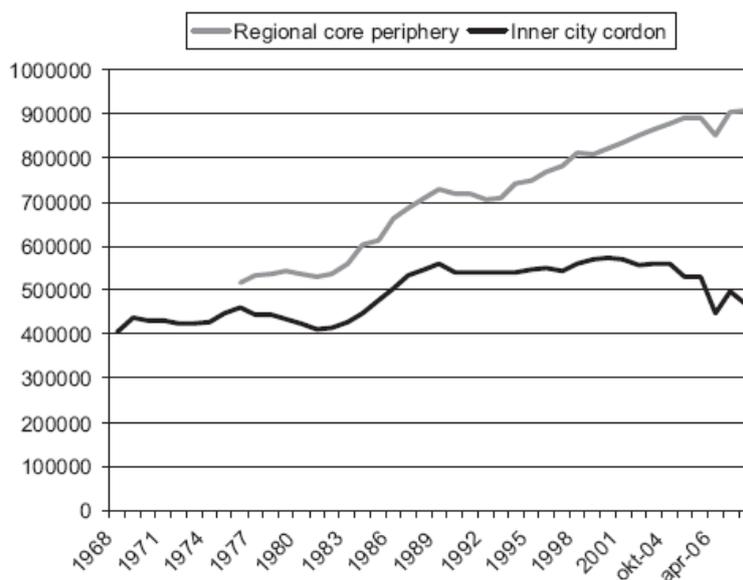
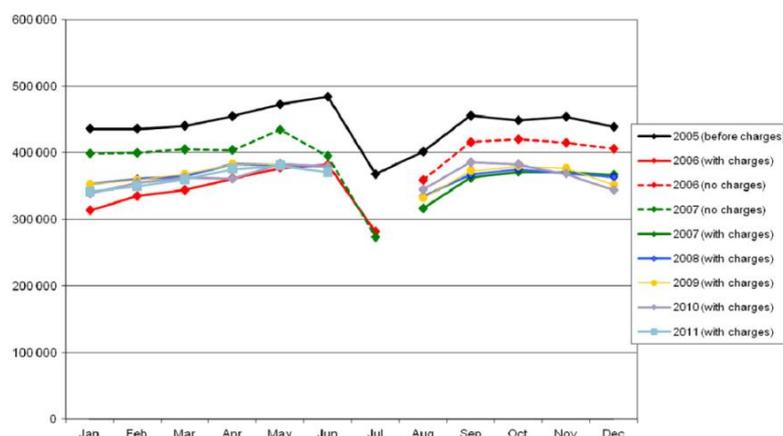


Figura 23. Volumen de tráfico durante el periodo 1968-2006 en Estocolmo. Fuente: (Eliasson, 2009).

### *Efectos en el volumen de tráfico*

Los efectos en el tráfico como consecuencia del funcionamiento del peaje urbano de Estocolmo se vieron inmediatamente. En la Figura 24 se muestra el número de vehículos cruzando el cordón los días laborables en horario de 6:00-19:00h durante el periodo 2005-2008; por otra parte en la Tabla 14 se presentan los resultados del porcentaje de reducción de tráfico comparado con el año 2005. Podemos observar que el primer mes de aplicación de la tarifa el volumen de tráfico llegó a reducirse casi un 30%, en los 7 meses posteriormente el porcentaje de reducción se logró mantener alrededor del 22%.

<sup>40</sup> “Southern link” en español Enlace Sur es una autopista sueca que conecta Essingeleden, Estocolmo con Värmdöleden, Nacka. Esta autopista de 6 km de longitud posee el tercer túnel urbano más largo de Europa después del de la M-30 de Madrid y Blanka en Praga.



**Figura 24. Número de vehículos a través del cordón, 2005-2011. Las líneas discontinuas indican el periodo de tiempo entre el final de la prueba y la reintroducción. Los porcentajes en la parte inferior es la disminución del tráfico con relación a 2005. Fuente: (Eliasson et al., 2012).**

Reduction in traffic volumes over cordon (weekdays 6–19) compared to reference (2005). *Figures in italics represent period without charging (Aug 2006–Jul 2007).*

Compared to 2005	Jan(%)	Feb(%)	Mar(%)	Apr(%)	May(%)	Jun(%)	Jul <sup>a</sup>	Aug(%)	Sep(%)	Oct(%)	Nov(%)	Dec(%)	Average(%)
<b>2006</b>	-28	-23	-22	-21	-20	-21	-24	-11	-9	-6	-9	-7	-21 (Mar–Jun)
<b>2007</b>	-9	-8	-8	-11	-8	-18 <sup>c</sup>	-26 <sup>b</sup>	-21	-20	-17	-18	-17	-19 (Aug–Dec)
<b>2008</b>	-19	-17	-17	-16	-19	-22	-	-17	-19	-16	-19	-17	-18 (excl. Jul)
<b>2009</b>	-19	-18	-16	-16	-19	-24	-	-17	-18	-15	-17	-20	-18(excl. Jul)
<b>2010</b>	-22	-1	-18	-21	-19	-22	-	-14	-15	-15	-19	-22	-19 (excl. Jul)
<b>2011</b>	-22	-20	-18	-17	-19	-23	-	-	-	-	-	-	-20(excl. Jul)

<sup>a</sup> From 2008 onwards the congestion charging system is not operating in July, and hence there are no measurements.

<sup>b</sup> The figures for June and July 2007 are affected by major roadworks.

**Tabla 14. Reducción de tráfico a través del cordón comparado con el año 2005. Fuente: (Eliasson et al., 2012).**

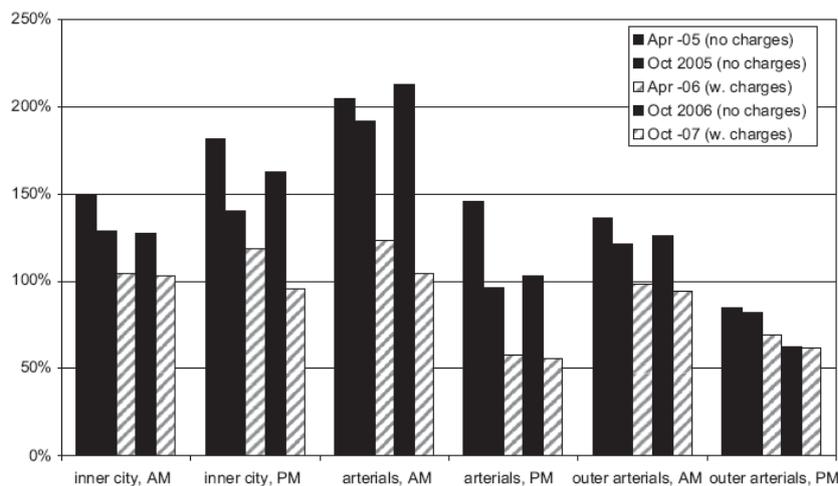
Finalizado el periodo de pruebas del peaje urbano de Estocolmo, el 31 de julio de 2006, el sistema dejó de funcionar provocando una recuperación casi inmediata de los niveles de tráfico anteriores a la tasa, aunque se observó cierto efecto residual. Aparentemente, algunos conductores desarrollaron nuevos hábitos durante el periodo de pruebas que persistieron después de su eliminación. Podemos encontrar estudios como “hysteresis” (Goodwin, 1997) que analizan este efecto.

Tras un tiempo de discusiones políticas, la tasa de congestión de Estocolmo se volvió a reintroducir el 1 de agosto de 2007, pero esta vez de forma permanente. Nuevamente los efectos en el tráfico fueron inmediatos y se volvieron a reducir los volúmenes de tráfico, en esta ocasión llegaron a disminuir entorno al 21% comparado con los niveles del año 2005. En los años posteriormente el tráfico, en general, a pesar de que el tráfico fue lentamente aumentando, probablemente fruto del aumento de la población y del número de vehículos, las reducciones medias de tráfico comparados con el año 2005 estuvieron alrededor del 20%.

Finalmente indicar que, aunque por lo general, el peaje urbano de Estocolmo logró reducciones importantes de tráfico en el centro de la ciudad, en vías como el “Southern Link” se observaron incrementos de hasta el 10% durante el periodo 2005-2006. Según (Eliasson, 2009) gran parte de ese aumento fue debido a un crecimiento autónomo del tráfico, el túnel comenzó a operar a finales del año 2004 y la circulación vehicular había estado creciendo constantemente desde su apertura.

**Efectos en el tiempo de viaje**

Hemos visto la drástica reducción del número de vehículos que provocó el peaje urbano en la ciudad de Estocolmo, pero aún más drástica fue la reducción de la congestión que originó, no sólo en el centro de la ciudad sino especialmente en las carreteras colindantes. En la Figura 25 se muestra el incremento de tiempo de viaje comprado con el tiempo de viaje en flujo libre, a veces llamado “índice de congestión”<sup>41</sup>. El índice de congestión se promedió sobre las diferentes categorías de viales urbanos – centro de la ciudad, arterias próximas al cordón y arterias alejadas del cordón. Las lecturas se tomaron durante seis semanas consecutivas y en cinco periodos de tiempo diferentes: abril y octubre del año 2005 (antes de aplicar la tasa por congestión), abril del año 2006 (durante el periodo de prueba del peaje urbano), octubre del año 2005 (después de que el peaje fuera abolido) y octubre del año 2007 (después de que la tasa por congestión fuera reintroducida). “AM” significa durante el pico de la mañana 7.30h-9.00h, mientras que “PM” significa durante el pico de la tarde 16.00h-18.00h. En el diagrama de la figura, los periodos sin peaje se grafían en negro, mientras que los periodos con peajes se grafían con rayas.



**Figura 25. Promedio de incrementos en los tiempos de viaje comparado con el flujo libre durante el periodo 2005-2007. Fuente: (Eliasson, 2009).**

Como se puede apreciar en la figura, las mayores reducciones de congestión se produjeron en las arterias. Por otro lado, en la Figura 26 se ilustra la desviación estándar en los tiempos de viaje durante 2005 (en el eje x) y 2006 (en el eje y), así como el diagrama de dispersión de los índices de congestión. Podemos observar que la mayoría de los puntos se encuentran por debajo de la línea de 45°.

<sup>41</sup> Índice de Congestión (Congestion Index, CI): Ratio entre el tiempo empleado y el tiempo que se emplearía en flujo libre.

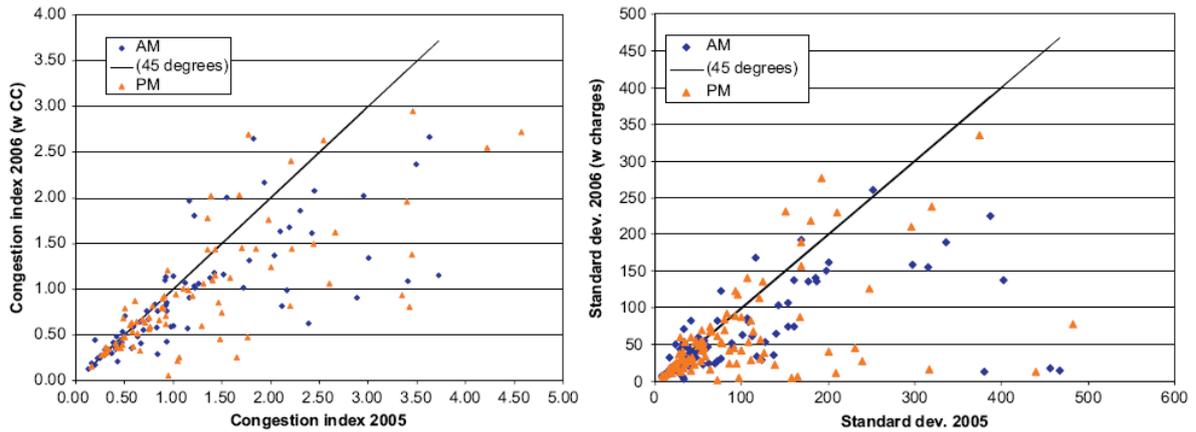


Figura 26. Diagrama de dispersión del índice de congestión y desviación estándar durante el periodo 2005-2007. Fuente: (Eliasson, 2009).

Posteriormente a la reintroducción del peaje, tan sólo se tomaron mediciones de tiempo de viajes en algunas arterias principales. Los datos en estas vías, hasta el año 2008, indicaron que los niveles de congestión se continuaban manteniendo.

**¿Qué pasó con los viajes en coche que desaparecieron?**

Las mediciones de tráfico sólo nos permiten identificar cambios en términos de su conjunto, y naturalmente no nos revelan como se adaptan los conductores a las nuevas condiciones, por ejemplo, si han cambiado de modo de transporte, si han realizado el viaje en un horario diferente, etc. Por este motivo en Estocolmo se realizaron dos encuestas de investigación relacionadas con los viajes en vehículo privados. Por diversos problemas legales finalmente se lograron realizar dos encuestas, una primera en el mes de enero del año 2006 y una segunda en marzo del mismo año. El corto periodo de tiempo entre las dos encuestas hacía que los resultados se pudieran ver influenciados por posibles efectos estacionales en el tráfico. Un intento de separar estos efectos estacionales fue descrito por (Franklin, J., Eliasson, J., Karlström, 2008). Los resultados finales de estas encuestas se pueden ver en la Figura 27 aunque deben tratarse con precaución debido a la dificultad de separar los efectos estacionales del tráfico.

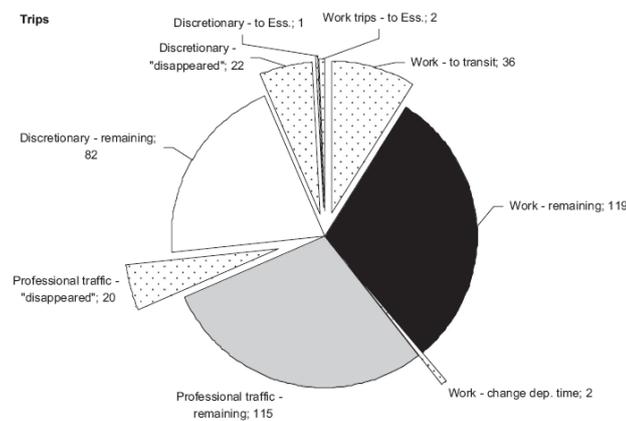


Figura 27. Cambios de viajes en vehículo privado a través del cordón tras el peaje. Fuente: (Eliasson, 2009).

(Franklin, J., Eliasson, J., Karlström, 2008) analizaron la respuesta de los viajeros a la introducción del peaje urbano estudiando los cambios generados tanto en los viajes de trabajo como en los discrecionales y profesionales. Encontraron que, tras la introducción de la tasa, el 24% de los viajes de trabajo en vehículo privado a través del cordón habían “desaparecido”, de los cuales salvo un 1% que cambió de ruta el resto pasó a otros modos de transporte. En cuanto a los viajes discrecionales, vieron que el 22% de ellos también “desapareció” pero, aunque no pudieron constatar donde fueron, si encontraron que no se transfirieron al transporte público. Al parecer la hipótesis más probable pasó por considerar que hubieran elegido otros destinos y menores frecuencias de viaje. Por último, observaron que los viajes profesionales alrededor del cordón, básicamente de negocios o de entrega de mercancías, disminuyeron alrededor del 15% debido a la elección de rutas diferentes para minimizar costes de viaje.

### ***Efectos ambientales***

La reducción del número de vehículos-kilómetros conseguida por el peaje urbano se transformó también en una reducción de las emisiones contaminantes en la ciudad. En el centro de la ciudad se llegaron a conseguir reducciones de hasta el 15% de gases contaminantes que, debido a ser una zona altamente poblada, provocaron un efecto importante desde el punto de vista de la salud de sus ciudadanos. Podemos encontrar más información sobre estos efectos en el estudio “Traveller responses to the stockholm congestion pricing trial: who changed, where did they go, and what did it cost them?” (Eliasson et al., 2008).

### ***Efectos en el comercio al por menor***

Introducir en la ciudad una medida como la tasa por congestión generó, desde sus inicios, temor sobre posibles efectos negativos sobre el comercio al por menor. Estudios como los de (Daunfeldt, Rudholm, & Rämme, 2009) no demostraron ningún efecto del peaje sobre este sector.

#### **4.4.4 Análisis coste beneficio**

Aunque es evidente pensar que la tasa por congestión debiera producir un beneficio social neto, no es tan evidente percibir si este excedente puede cubrir la inversión y los costes de operación del sistema, ni tampoco advertir si el proyecto es socialmente rentable. Los estudios realizados por (Eliasson, 2009b) muestran que el CBA<sup>42</sup> del peaje urbano de Estocolmo obtuvo un excedente social capaz de cubrir tanto la inversión como los costes de operación del sistema. Según estos estudios, la tasa por congestión de Estocolmo logró producir anualmente un beneficio social neto de alrededor 650 millones de SEK, o lo que es equivalente unos 71.5 millones de Euros (ver Tabla 15). Nótese que en este resultado no estaban incluidos los costes de inversión del sistema. Eliasson llegó a estas conclusiones utilizando, entre otros, los siguientes valores para el cálculo del CBA:

---

<sup>42</sup> CBA- “Cost Benefit Analysis” Análisis Coste Beneficio.

- Valor medio del tiempo: 122 SEK/h (equivalente a unos 13 €/h).
- Valor de las emisiones de CO2: 1.5 SEK/kg (equivalente a unos 0.165 €/kg).
- Valor de una vida sueca: 17.5 mSEK (equivalente a unos 1.6 m€).
- Valor de lesiones graves: 3.1 mSEK (equivalente a unos 0.3 m€).
- Valor de lesiones leves: 0.18 mSEK (equivalente a unos 0.02 m€).
- Valor del coste de operación del sistema: 220 mSEK (equivalente a unos 20 m€). Se incluyeron en este valor no solamente los costes del funcionamiento del sistema, sino también su mantenimiento, así como los costes de posibles reinversiones provocadas por posibles sustituciones de cámaras u otro tipo de hardware del sistema.
- Valor del factor del coste marginal de los fondos público: 1.3 (basado en estudios Hansson, 1984; ver también Lundholm, 2005; SIKÅ, 2002).
- Valor del factor de corrección de los impuestos: 1.23 (para más información ver SIKÅ, 2002).

Una de las variables que tenía mayor impacto sobre el resultado del CBA fue el valor del tiempo de viaje, de ahí la importancia de que este valor estuviera soportado por un estudio de detalle. En el caso de Estocolmo se realizaron campañas de mediciones, de tiempos y flujos de viaje, antes y después de poner en marcha el peaje.

**Table 2**  
Benefits and costs, million SEK per year.

	Loss/gain	See section:
<i>Consumer surplus</i>		
Shorter travel times	536	4.1-4.2
More reliable travel times	78	4.3
Loss for evicted car drivers, gain for new car drivers	-74	4.1
Paid congestion charges	-804	2.2
Increased transit crowding	-15	5.3
Consumer surplus, total	-279	
<i>Externalities</i>		
Reduced greenhouse gas emissions	64	5.1
Health and environmental effects	22	5.1
Increased traffic safety	125	5.2
Externalities, total	211	
<i>Government costs and revenues</i>		
Paid congestion charges	804	2.2
Increased public transit revenues	138	5.3
Decreased revenues from fuel taxes	-53	4
Increased public transport capacity	-64	5.3
Operating costs for charging system (including reinvestment and maintenance)	-220	2.1-2.2
Government costs and revenues, total	606	
<i>Tax effects, etc.</i>		
Marginal cost of public funds	182	3
Correction for indirect taxes	-65	3
Net social benefit, exclusive investment costs	654	

Tabla 15. Coste-beneficio del sistema, en MSEK por año. Fuente: (Eliasson, 2009).

En la tabla adjunta podemos ver que como, a pesar de que el excedente total del consumidor es negativo, las ganancias generadas por el peaje, en lo referente a ahorros de tiempo de viaje, pueden ser comparadas con los ingresos obtenidos por la tasa de congestión. Podemos apreciar que aproximadamente las ganancias del tiempo de viaje fueron casi el 70% de los ingresos del peaje. Este “casi equilibrio” se lograba en parte debido a los “efectos en la red”, por los que había viajes que, a pesar de no cruzar el cordón, y por lo tanto no pagar la tasa, se beneficiaban de la reducción de la congestión. A esto había que sumar un alto número de viajes profesionales que, por tener altos valores en su tiempo de viaje, generaban una demanda muy inelástica. Por otro lado, si comparamos el beneficio social neto con los costes de inversión y operación del sistema, que fueron estimados en 1900 mSEK, la inversión en términos socioeconómicos se recuperaba en 4 años, en cambio en términos financieros para una tasa de descuento del 4%, según Eliasson, la inversión era recuperada en 3.5 años.

(Prud'homme, Kopp, & Evaluation, 2006) realizaron también un análisis coste-beneficio del peaje urbano de Estocolmo. En este caso, a diferencia del estudio de Eliasson mostraron que la tasa por congestión Estocolmo había generado una gran pérdida social. La principal diferencia entre ambos estudios radicaba en las ganancias producidas por el ahorro de tiempo de viaje. Otra de las grandes diferencias fue derivada de la consideración de los costes de la extensión del transporte público y de la puesta en marcha del peaje que hicieron aumentar la pérdida social neta del CBA.

#### **4.4.5 Reflexiones sobre el periodo de prueba del peaje urbano de Estocolmo**

De acuerdo a las experiencias derivadas de la implantación del peaje urbano de Estocolmo podemos plantearnos tres interesantes cuestiones: a) ¿Son transferibles los resultados de Estocolmo a otras ciudades?; b) ¿Por qué, al contrario de lo que decían las teorías clásicas de economía del transporte, la opinión de los ciudadanos sobre el peaje urbano cambió?; y c) ¿Qué factores fueron claves durante la prueba piloto del peaje para que fuera visto como una “éxito”?

##### ***¿Son transferibles los resultados?***

Podemos decir que, en muchos aspectos, cada ciudad es única. Aplicar en otras ciudades un esquema de peaje urbano como el de Estocolmo, no nos da garantías de conseguir sus mismos resultados. A pesar de ello, podemos argumentar que la experiencia del peaje puede ser transferida a otras ciudades, en el sentido del cambio que provoca en el comportamiento de los conductores, al estar fuertemente influenciados por el cambio en los costes generalizados del viaje. Se ha demostrado que los modelos de transporte pueden predecir, de una manera razonable, estos cambios.

Durante el proceso de diseño del peaje urbano de Estocolmo, los diferentes modelos de transporte utilizados obtuvieron resultados muy similares, a pesar de que los tres modelos empleados se calibraron con diferentes datos y se aplicaron utilizando diferentes metodologías. No obstante, las predicciones resultantes de estos modelos se consideraron poco realistas, puesto que no se creía que el peaje fuera a afectar tanto al tráfico.

La lección aquí aprendida es doble. Por un lado, la configuración de un buen modelo de transporte es una herramienta inestimable para diseñar un esquema de peaje eficiente y, por otro, los resultados obtenidos por los modelos, teniendo en cuenta sus limitaciones, probablemente serán correctos.

Por tanto, de la experiencia de Estocolmo podemos decir que la “lección transferible” podrían ser que un peaje urbano que parezca funcionar bien en un buen modelo de transporte, probablemente funcione en la realidad.

### ***¿Por qué cambió la opinión?***

Una de las principales sorpresas tras la implantación del peaje en la ciudad Estocolmo fue el cambio que hubo de la opinión pública. Antes de introducirse la tasa por congestión en la ciudad, el soporte ciudadano a la medida era inferior al 30%, justo después de finalizar el periodo de pruebas superó el 50% y, asombrosamente, a finales del año 2007 tras su reintroducción los favorables al peaje fueron de casi el 70%. Es sorprendente ver cuántas personas admitieron haber cambiado su opinión acerca del peaje urbano. Un fenómeno bien conocido es la tendencia de la gente a no admitir cambios en sus convicciones. Pero en este caso, un gran porcentaje de personas, aproximadamente el 35%, respondieron “sí” a preguntas como “¿Ha cambiado su opinión durante el periodo de prueba de la tasa por congestión?” (The City of Stockholm Office of Research and Statistics, 2006). Después de la reintroducción del peaje, en diciembre del año 2007, se realizó una nueva encuesta donde se preguntó a los ciudadanos si había cambiado su forma de pensar sobre la prueba piloto del peaje. En esta ocasión tan sólo el 22% de los encuestados reconoció haber cambiado de opinión.

La opinión de los medios de comunicación también fue cambiando drásticamente hasta la finalización del periodo de pruebas del peaje— desde “Tasa por Congestión: incluso más caos que la tarificación vial” (*Aftonbladet*, 22 de diciembre de 2005) a “Stock-Holmers aman la Tasa por Congestión – La gente se ha dado cuenta de sus ventajas – El canto fúnebre se convirtió en alabanza” (*Aftonbladet*, 14 de enero de 2006). El número de artículos en periódicos que expresaron una visión positiva de la tasa por congestión pasó del 3% , durante el otoño de 2005, hasta el 42% durante el otoño de 2006; mientras que el número de artículos negativos se redujo a casi a la mitad, pasando del 39%, en otoño del 2005, hasta el 22% en otoño del 2006 (Winslott Hiselius, L., Brundell-Freij, 2007).

Naturalmente, había muchas razones para dar soporte a la tasa por congestión y, también muchas, para no hacerlo (se puede encontrar un análisis de la opinión pública sobre el peaje urbano en Winslott-Hiselius, Brundell-Freij, Vagland, & Byström, 2009). En la Figura 28 se muestran los resultados obtenidos a la pregunta realizada “¿Cree que fue buena o mala idea realizar un periodo de prueba de la tasa por congestión en Estocolmo?”. Los resultados manifiestan que se fueron produciendo cambios en la opinión pública a medida que se iba introduciendo la tasa. Podemos ver que, en marzo del año 2006, el número de ciudadanos con opinión positiva superó a los de opinión negativa.

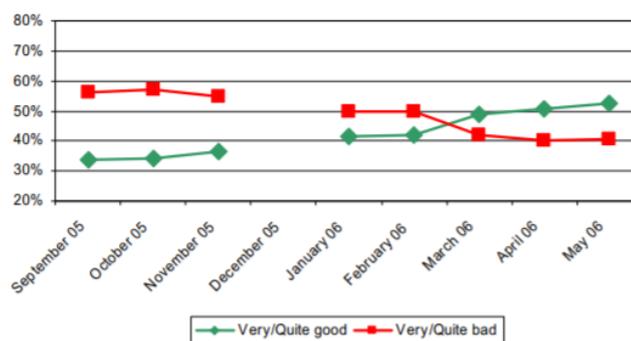


Figura 28. ¿Cree que fue buena o mala idea realizar un periodo de prueba de la tasa por congestión en Estocolmo?  
Fuente: (Winslott-Hiselius et al., 2009).

Según (Hårsman, 2003; Tretvik, 2003) después de introducir una tasa por congestión la opinión pública puede ser más positiva. Una de las explicaciones posibles a esta afirmación es que los ciudadanos pudieron haber subestimado los beneficios producidos por el alivio de la congestión. (Schade & Baum, 2007) explican este fenómeno como un conflicto de aproximación-evitación. De acuerdo con los actuales estándares de la teoría de transporte, muchos de los automovilistas no pensaron que el tiempo ahorrado sería superior a lo que tenían que pagar. En la Figura 29 se muestra un gráfico donde se puede ver como la opinión ciudadana de los peajes urbanos noruegos mejoró después de un año de aplicación.

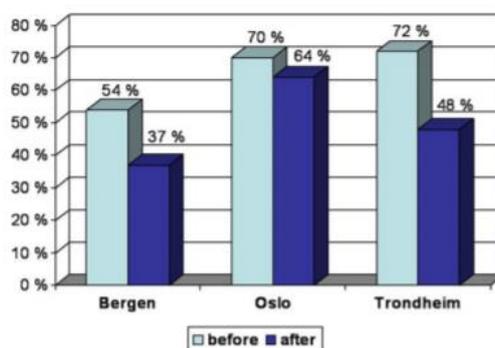


Figura 29. Porcentajes de opiniones negativas un año después del funcionamiento de los peajes urbanos de Bergen, Oslo y Trondheim. (Schade & Baum, 2007).

Teóricamente, los ingresos del peaje urbano deben ser suficientes para compensar a los perdedores, por ello se recomienda que con estos ingresos se desarrollen proyectos que generen beneficios para el público en general, y así aumentar las posibilidades de que el sistema sea aceptado (ver ejemplo Börje, Johansson; Lars-Göran, 1991; Jones, 1991; Small, 1992; Thomson, 1998; Langmyhr, 1997). Sin embargo, en el caso de Estocolmo los beneficios generados durante la prueba piloto no se usaron con este fin. Es cierto que algunos de los ingresos se usaron para mejorar el transporte público durante ese periodo, pero sus ventajas no fueron percibidas por la mayoría de los ciudadanos. Éste podría haber sido un motivo por el que gran parte de la población pudiera haber pensado que, en general, ellos habían sido los perdedores. Dicho esto, también hubo otra parte de ciudadanos para los que el tiempo que ahorran compensaba el pago de la tasa.

### ***¿Por qué un éxito?***

Fue típico que los periódicos tildaran de éxito la prueba piloto del peaje urbano de Estocolmo. Aunque ciertamente no todo el mundo estuvo a favor de la tasa por congestión, el cambio general de opinión que reflejaban los medios de comunicación la parecía justificar. ¿Pero cuáles fueron los factores claves? “Gunnar Söderholm, jefe del “Congestion Charging Office” responsable (entre otras cosas) de la evaluación e información; Birger Höök, jefe del “Congestion Charging Office” de la administración de carreteras, responsable del sistema técnico de pagos y tecnología; Gunnar Johansson, jefe del consorcio IBM-led que desarrolló y explotó el sistema de peaje”; y Jonas Eliasson responsable del diseño inicial del sistema; a menudo mencionaban cinco razones como las principales:

- El sistema técnico implantado funcionó: que el sistema funcionará desde el principio fue sin duda un factor clave de éxito del sistema. El número de errores en la identificación de vehículos fue extremadamente bajo, y desde la perspectiva ciudadana, las cosas funcionaban casi a la perfección. Además, la Administración de Carreteras hizo grandes esfuerzos para desarrollar un sistema fácilmente entendible por los ciudadanos.
- La campaña de información funcionó: aparentemente, la gente sabía qué hacer. Se realizaron estudios para anticiparse y dar solución a los problemas que podían surgirles a la gente. Se les informó claramente desde el primer día sobre dónde y cómo debían pagar el peaje. También hubo información precisa como tenían que reclamar en caso de disconformidades.
- Visible reducción en la congestión: las mejoras del tiempo de viaje y del medio ambiente urbano fueron visibles desde el inicio. El asombro de ver calles casi vacías durante las horas punta, en particular durante los cinco primeros meses, fue sorprendente. Después de que se demostrara la potencia abrumadora del peaje urbano de Estocolmo, los argumentos negativos como “no va a funcionar” se desplazaron a otro más positivos y constructivos.
- Evaluación extensa y científica del sistema que involucró a muchos expertos e investigadores: incluso siendo los efectos visibles, uno debe subrayar la importancia de ser capaz de proporcionar a los medios de comunicación cifras sobre la reducción en los volúmenes de tráfico y congestión. Especialmente desde el shock causado por los enormes efectos iniciales, que fueron extremadamente importantes para los profesionales, investigadores y expertos, y que vinieron desde diferentes campos y organizaciones.
- Objetivos claros: el sistema tenía un objetivo claro y medible – reducir la congestión y mejorar el medio ambiente en el centro de la ciudad – y el sistema se diseñó en función de estos objetivos que fueron cumplidos.

#### **4.4.6 Conclusiones**

Tener que pagar por algo que solías usar gratuitamente nunca es popular, y mucha gente lo ve mal, especialmente al principio, hasta que se adoptan gradualmente nuevos hábitos de viaje. Estos sacrificios tienen que ser ponderados frente a los efectos positivos en la accesibilidad y el medio ambiente de la aplicación de un peaje urbano, así como la posibilidad de usar los ingresos que genera para inversiones destinadas a mejorar el transporte público en la ciudad.

Entre los investigadores del transporte, no es probablemente una opinión controvertida, encontrar que es útil y probablemente necesario, adoptar fórmulas para asegurar que los sistemas de transporte en las grandes ciudades continúen funcionando de una manera razonablemente eficiente. Los peajes urbanos pueden dar soluciones en esa línea, aunque a algunas administraciones les puede preocupar que sus efectos se vean atenuados con el tiempo. En este sentido (Börjesson, Eliasson, Hugosson, & Brundell-Freij, 2012) observaron que tras 5 años de funcionamiento, el peaje urbano de Estocolmo continuaba consiguiendo reducciones de tráfico y mejoras en los tiempos de viaje, demostrando incluso, que sus efectos pueden aumentar a lo largo del tiempo, siempre y cuando se logren controlar factores como el crecimiento del empleo, la inflación y las regulaciones fiscales.

Uno de los efectos que quizás más sorprendió con el funcionamiento de la tasa por congestión de Estocolmo fue el cambio que hubo hacia la aceptación pública de la medida. Este cambio, probablemente, vino motivado por la evidente reducción de la contaminación y congestión en la ciudad que, junto con la reversión de los ingresos del peaje en mejoras del sistema de transporte público, pueden ser algunos de los factores esenciales para lograr el apoyo político y ciudadano de la actuación.

### **4.5 El caso de Gotemburgo. Efecto, diseño y política**

#### **4.5.1 Introducción**

Siguiendo los pasos de Estocolmo la ciudad Gotemburgo, segunda ciudad más grande de Suecia, introdujo en enero del año 2013 un esquema de peaje urbano, tipo cordón, a través del cual sus usuarios debían pagar una tarifa por cruzarlo. De esta manera Gotemburgo, tomando como referencia la experiencia en ciudades como Singapur (Xie & Olszewski, 2011); Londres (Santos, G., Shaffer, 2004); Estocolmo (Börjesson et al., 2012), (Eliasson et al., 2009) y Milán (Carnovale, M., Gibson, M., 2013), se convirtió en una de las últimas ciudades europeas en sumarse a la medida de reducir los problemas de congestión implantando un peaje urbano. Por ello, es interesante analizar el caso de Gotemburgo para lo cual nos apoyaremos en los trabajos realizados por (Börjesson & Kristoffersson, 2015).

El peaje urbano de Gotemburgo es similar, en ciertos aspectos, al peaje urbano de Estocolmo. Sin embargo, los objetivos y la justificación de ambos peajes, como solución para reducir la congestión, son diferentes entre ambas ciudades. Ya se ha mencionado, que uno de los principales objetivos de los peajes urbanos

noruegos fue la de generar ingresos para utilizarlos en promover inversiones en infraestructuras de transporte (Ieromonachou, Potter, & Warren, 2006) aunque también perseguían objetivos secundarios como reducir la congestión y mejorar el medio ambiente local. En Gotemburgo, los políticos intentaron hacer ver a la ciudadanía la necesidad de aplicar el peaje urbano como una medida medio ambiental, aunque realmente lo que pretendían era recaudar impuestos para gastarlos en un paquete de infraestructuras de bajo rendimiento social.

Gotemburgo es una ciudad pequeña, de unos 500.000 habitantes, que presentaba problemas de congestión limitados a unos cuantos cruces de carreteras. La proporción de viajes en transporte público era sustancialmente más baja que en las ciudades de Estocolmo, Londres y Singapur. Este hecho diferencial hace que estudiar el peaje urbano de Gotemburgo sea interesante puesto que, a menudo, se supone que el transporte público es un factor clave tanto para la efectividad como para el apoyo público de la tasa por congestión (Santos, 2005).

Como ya hemos visto, existen pocas ciudades en el mundo que hayan decidido poner en funcionamiento sistemas de peaje urbano. (Santos et al. 2008) indican la falta de apoyo ciudadano, que implica directamente un bajo interés político, como una de las principales razones al rechazo de la medida. En el caso de Gotemburgo tiene especial interés ver cómo, a pesar del bajo apoyo público, finalmente la tasa por congestión logró ser introducida.

En contra de lo que se podía pensar, el peaje urbano de Estocolmo no allanó el camino para introducir la tasa por congestión en Gotemburgo, no obstante, a diferencia de Estocolmo, este último sí que tuvo un gran soporte político. Los políticos gotemburgueses, basándose en las experiencias de Estocolmo, trataron de promocionar la medida prometiendo importantes inversiones en infraestructuras del transporte, que financiarían con los ingresos generados con el peaje urbano. A pesar de estas promesas, el referéndum celebrado en septiembre del año 2014 dio como resultado que, un 57% de los votantes, estaban en contra de la tasa por congestión. Estos malos resultados no impidieron al Ayuntamiento de Gotemburgo finalmente implantar la actuación, puesto que los políticos pensaban, que al igual que ocurrió en Estocolmo, el apoyo ciudadano iría aumentando a medida que los ciudadanos apreciaran las bondades del sistema.

De la experiencia de las ciudades que lograron finalmente poner en marcha peajes urbanos podemos comprobar que, a excepción de Singapur, lo consiguieron tras alcanzar un amplio apoyo ciudadano para lo que vendieron la medida como un instrumento que ayudaría a mejorar la calidad de vida de las personas, y no como un instrumento cuya finalidad sería la de aumentar los ingresos públicos vía impuestos. En Gotemburgo, siguiendo las experiencias existentes, los políticos intentaron vender la medida como una actuación necesaria para mejorar la calidad ambiental del entorno urbano, aunque realmente lo que pretendían era recaudar impuestos para gastarlos en un paquete de infraestructuras de bajo rendimiento social.

Del caso de Gotemburgo podemos extraer la conclusión de que poner en marcha un peaje urbano no sólo depende, como ya habíamos visto, del apoyo público y de los beneficios generados por el sistema, como la reducción de la congestión y la contaminación, sino que también es clave el apoyo político de los diferentes grupos parlamentarios a la medida. La importancia del apoyo tanto público como político puede explicar por qué muchas ciudades como Edimburgo, Manchester, Helsinki, Copenhague y Nueva York, no han llegado a introducir sistemas de peaje urbano a pesar de sus altos niveles de congestión. En el caso de Nueva York, los resultados de las consultas realizadas indicaron que el 67% de los residentes respaldaban la medida siempre y cuando el dinero generado por el peaje se usara para mejorar el transporte público de la ciudad (Schaller, 2010).

#### **4.5.2 Diseño**

Las primeras propuestas de diseño se basaban en el convencimiento de que sería fácil copiar en Gotemburgo el esquema de peaje de Estocolmo, estableciendo un cordón de peaje alrededor del centro de la ciudad. Sin embargo, en la realidad, diseñar un sistema de peaje urbano es una tarea difícil puesto que el esquema debe adaptarse a las condiciones locales de cada ciudad. Las ciudades de Goteburgo y Estocolmo presentaban diferencias importantes. Una de ellas era que la congestión localizada en los cuellos de botella de Gotemburgo no se encontraba en las vías principales que se dirigían hacia el centro de la ciudad, sino más bien estaba en las arterias viales que conducían hacia el sistema de autopistas. Además, Gotemburgo presentaba otras diferencias relevantes respecto a Estocolmo, como:

- Tenía menos de la mitad del tamaño de Estocolmo.
- Tenía una congestión más limitada.
- El transporte público, básicamente tranvías y autobuses, tenía una menor contribución a la movilidad de la ciudad. La baja densidad de la ciudad hacía que muchos puestos de trabajo no se concentraran en el centro de la ciudad. Según (Björklind et al., 2014) en el año 2012 la cuota de mercado de transporte público en la zona de peaje de Gotemburgo fue del 26%, mientras que en Estocolmo era del 77%.
- Tenía una menor cuota de mercado de otros modos de transporte como caminar y la bicicleta. Mientras que dentro del área tarifada de Gotemburgo en el año 2013 estos modos representaban una cuota del 10%, en Estocolmo significaron el 6%.

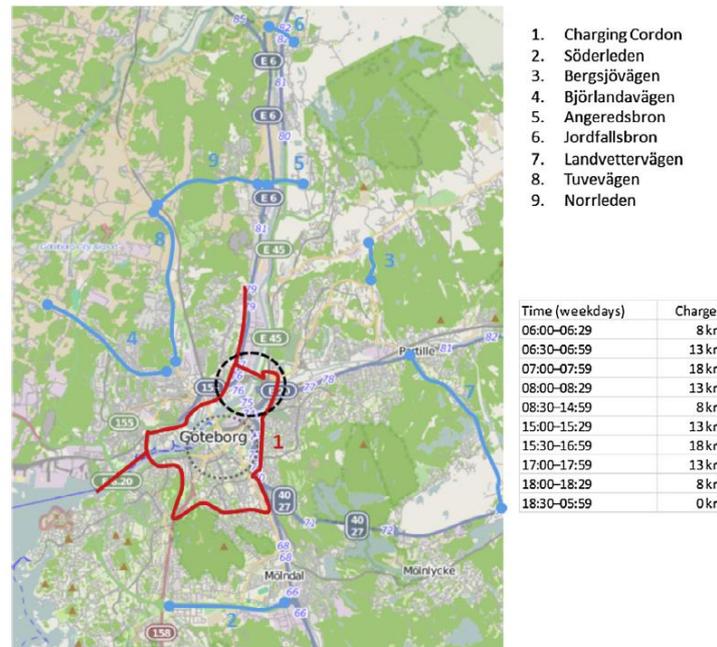


Figura 30. Cordón de peaje de Gotemburgo. Fuente: (Börjesson & Kristoffersson, 2015).

Las autoridades de Gotemburgo intentaron estimar los cambios en los patrones de viaje, previstos por la introducción del peaje, con la ayuda de modelos de tráfico como el modelo de transporte nacional Sampers<sup>43</sup> (Beser, M., Algers, S., 2002). En líneas generales la utilización del modelo de transporte de Sampers consistía en aplicar modelos de demanda logit anidados con seis categorías de viajes (trabajo, escuela, negocios, recreación, social y otros), diferentes frecuencias de viaje, destinos y modos de transporte (automóvil, transporte público, caminar y bicicleta). Los modelos de demanda incluían viajes privados y de negocios. Se analizaron tres períodos de tiempo (pico de mañana, pico de tarde y fuera de horas pico). Los flujos de tráfico se calcularon utilizando el paquete de software EMME/3 (INRO Consultants Inc., 2010).

La topografía de Gotemburgo complicó el diseño del sistema. La falta de barreras naturales en la ciudad implicó que la cantidad de puntos de control en Gotemburgo fuera superior a los de Estocolmo (38 frente a los 18 de Estocolmo).

Durante la fase de diseño se evaluaron cinco tipos diferentes de configuraciones del peaje en cordón (i) un anillo interior, (ii) un anillo exterior, (iii) un anillo interior y otro exterior, (iv) un cordón a lo largo del río, y (v) un anillo interior y un cordón a lo largo del río. Como hemos comentado, los objetivos que las autoridades perseguían con el peaje fueron: aumentar los ingresos públicos, aliviar la congestión, mejorar el entorno local, evitar atajos y causar efectos sobre la elección del modo de transporte. Según los estudios realizados el cordón interior de peaje fue el que tuvo los mejores resultados, mientras que el cordón exterior

<sup>43</sup> Sampers es un modelo de transporte nacional del "Swedish Institute for Transport and Communications Analysis (SIKA)" utilizado como herramienta central en la planificación de infraestructuras en Suecia.

fue rechazado por haberse demostrado que tenía efectos insignificantes o inciertos sobre las variables objeto de estudio.

En cuanto a la tecnología utilizada en el peaje de Gotemburgo podemos decir que fue la misma que la que se utilizó en Estocolmo. La solución tecnológica consistía en utilizar cámaras de reconocimiento automático de matrículas ANPR capaces de identificar, mediante las fotos que realizaban, la matrícula (tanto delantera como trasera) de los vehículos que entraban o salían del peaje. Tras la entrada en funcionamiento del peaje se demostró que estas cámaras contaron con una tasa de reconocimiento de matrículas del 94% a enero del año 2013.

Finalmente, como se puede ver en la Figura 30, el esquema elegido consistió en un cordón circular, más dos cuernos, con una tarifa que oscilaría entre los 8-18 SEK, dependiendo del horario de uso, y que se aplicaría los días laborables durante el horario de 6:00-18:30h. Los vehículos deberían pagar la tasa al cruzar el cordón en ambas direcciones, aunque si se cruzaba el cordón en más de una ocasión dentro de 60 min, únicamente se tendría que pagar la tarifa más alta. El coste máximo diario de la tasa no podría exceder de los 60 SEK.

#### **4.5.3 Efectos de la tasa por congestión sobre el volumen de tráfico**

Los efectos en la reducción del volumen de tráfico tras la puesta en funcionamiento del peaje urbano de Gotemburgo, en líneas generales, fueron inferiores a los observados en Estocolmo. (Börjesson & Kristoffersson, 2015) detallan estos efectos analizando la variación del volumen de tráfico tanto a través del cordón como en el centro de la ciudad, así como en las carreteras colindantes a Gotemburgo. Las conclusiones más relevantes se exponen a continuación:

##### **a) Volumen de tráfico a través del cordón**

La disminución del volumen de tráfico a través del cordón en Gotemburgo, como consecuencia del peaje, tuvo un ajuste más lento que el observado en Estocolmo. Mientras que en Estocolmo el ajuste se consiguió ya el primer mes de funcionamiento del peaje urbano, Gotemburgo lo logró después de ocho meses; consiguiendo reducir el tráfico alrededor de un 12%. En la Figura 31 se muestra el número de vehículos anuales a través del cordón los años 2012 y 2013, podemos observar que el tráfico permaneció razonablemente constante.

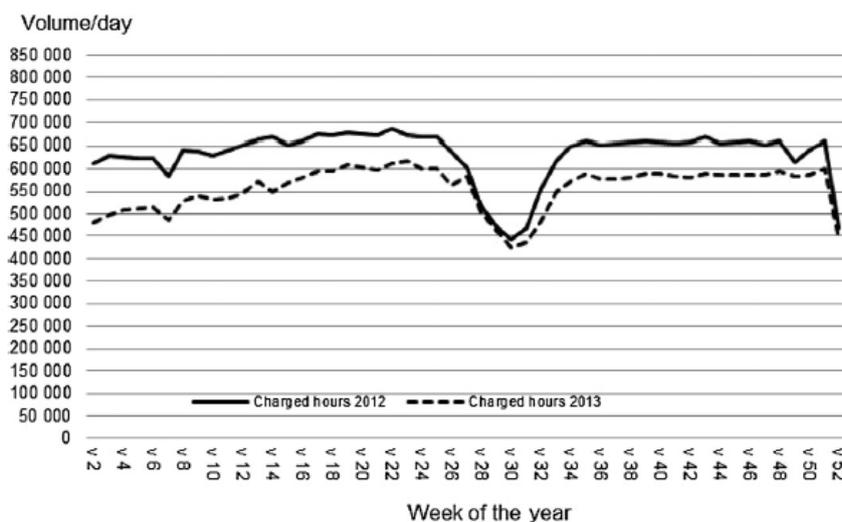


Figura 31. Número de vehículos a través del cordón durante los años 2012 y 2013. Fuente: (Börjesson & Kristoffersson, 2015).

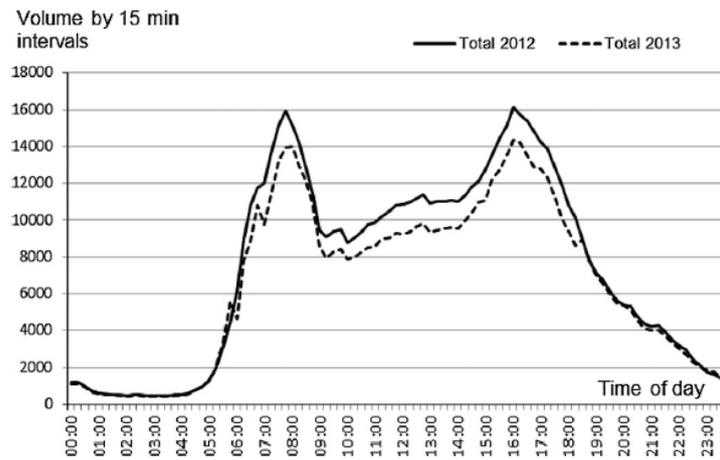
Por otro lado, en la Tabla 16 y en la Figura 32, podemos ver como la reducción del tráfico fue algo superior durante las horas punta de la mañana, mientras que permaneció en gran medida sin cambios fuera del horario de peaje. Estos efectos fueron similares a los que se observaron en el peaje de Estocolmo durante los primeros años de su funcionamiento (Kristoffersson, I. 2013). Además, podemos ver como las reducciones observadas frente a las predichas por los modelos de transporte estuvieron aproximadamente en la misma línea.

Table 1  
Decrease in traffic volume over the cordon for different periods of the day.

October 2012-2013	Observed (%)	Forecast (%)
AM peak	-13	-18
PM peak	-12	-18
Mid-day	-12	-13
Charged hours	-12	-15
Uncharged hours	-2	0

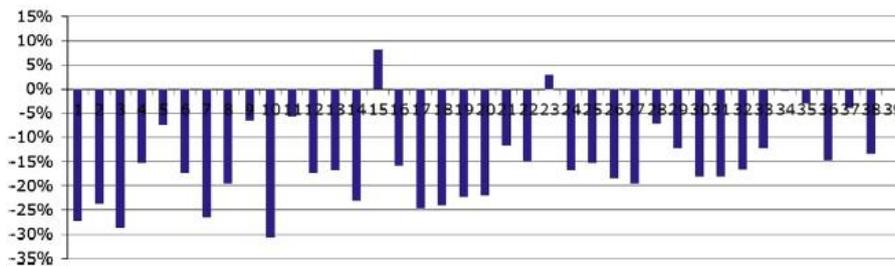
Tabla 16. Reducción del volumen de tráfico a través del cordón durante diferentes periodos del día. Fuente: (Börjesson & Kristoffersson, 2015).

En la Figura 32 se compara la reducción, a través el cordón, del volumen de tráfico diario en intervalos de 15 minutos durante los años 2012 y 2012. Como ya se ha comentado, se aprecia un comportamiento del tráfico parecido en ambos años.



**Figura 32. Volumen de tráfico diario a través del cordón durante periodos de 15 min. Fuente: (Börjesson & Kristoffersson, 2015).**

Por otra parte, en la Figura 33 se muestran las reducciones tráfico en los 38 puntos de control establecidos en el peaje. La imagen indica diferencias sustanciales entre los diferentes puntos. Se observan, por un lado, puntos con reducciones de hasta el 30% y otros con aumentos del tráfico de hasta el 8%. Estos aumentos podrían indicar efectos derivados del cambio de rutas.



**Figura 33. Cambios del volumen de tráfico en Gotemburgo en diferentes puntos de control. Fuente: (Börjesson & Kristoffersson, 2015).**

b) Volumen de tráfico en el centro de la ciudad

La introducción de la tasa por congestión en Gotemburgo llevó asociadas otras medidas orientadas a mejorar el sistema de transporte público de la ciudad. Estas medidas, básicamente, consistieron en la ejecución de nuevos carriles para autobuses urbanos que provocaron una reducción en la capacidad vial y en las plazas de estacionamiento en el centro de la ciudad. Por tanto, podemos decir que estas medidas adicionales amplificaron los efectos previstos por el peaje urbano. sobre la reducción del tráfico en la zona central de la ciudad.

En la Tabla 17 se muestran los resultados de la variación del volumen de tráfico en diez calles urbanas analizadas. Podemos ver que, durante las horas tarifcadas, hubo una reducción media del tráfico del 9%, sin embargo, en esas mismas vías durante las horas no tarifcadas la reducción media fue del 6%.

Según (Börjesson & Kristoffersson, 2015) las medidas adicionales al peaje urbano en Gotemburgo redujeron el tráfico vehicular en el centro de la ciudad entre un 4-6%, lo que sugiere que la reducción del tráfico derivada de la tasa por congestión fue de entre el 3-5%. Hay que tener en cuenta que estas cifras surgen del análisis de la muestra de las diez calles analizadas. En líneas generales, se observó que la reducción de tráfico en el centro de Gotemburgo fue parecida a la observada en Estocolmo.

	Charged hours (%)	AM peak (%)	PM peak (%)	Mid-day (%)	Non-charged hours (%)
Ullevigatan	-15	-15	-15	-14	-11
Sten Sturegatan	-18	-28	-22	-13	-16
Nya Allén	-8	-11	-4	-10	1
Engelbrektsgatan	1	0	0	3	-2
Vasagatan	6	10	14	0	12
Per Dubbsgatan	-14	-17	-18	-10	-9
Eklandagatan	-6	-8	-7	-5	-5
Parkgatan	9	10	10	8	9
Linnegatan	-3	-3	2	-4	-4
Aschebergsgatan	-16	-17	-18	-14	-12
Weighted average	-9	-11	-10	-8	-6

Tabla 17. Variación del tráfico en calles del centro de la ciudad. Fuente: (Börjesson & Kristoffersson, 2015).

c) Volumen de tráfico en las carreteras periféricas

Durante la fase de diseño del peaje urbano de Gotemburgo, como consecuencia de la topología de red de transporte de la ciudad, los modelos predictivos de tráfico indicaron que la tasa por congestión provocaría un efecto secundario que consistiría en un aumento del tráfico en ciertas carreteras periféricas de la ciudad. Tras la puesta en funcionamiento del peaje urbano se pudo confirmar que los modelos acertaron en sus predicciones, a excepción del tráfico que previeron en la carretera de Jordfallsbron donde, por no haber introducido en el modelo cambios en la elección de rutas como consecuencia de las obras de reconstrucción de la carretera adyacente E45, dieron resultados erróneos. En la Tabla 18 se muestran los resultados de la variación del volumen de tráfico en las carreteras periféricas de Söderleden, Bergsjövägen, Björlandavägen, Angeredsbron, Jordfallsbron, Landvettervägen, Tuevägen y Norrleden, así como su correspondencia de resultado con la predicción de tráfico que hizo el modelo de transporte. Podemos observar cómo algunas de las carreteras como Landvettervägen, Jordfallsbron y Norrleden presentaron aumentos sustanciales en los volúmenes de tráfico.

	Observed					Forecast
	Charged hours (%)	AM peak (%)	PM peak (%)	Mid-day (%)	Non-charged hours (%)	AM peak (%)
Söderleden	1	1	-1	2	3	3
Bergsjövägen	6	3	6	7	2	15
Björlandavägen	-2	-4	-4	0	4	-8
Angeredsbron	4	4	1	8	-1	18
Jordfallsbron	20	24	25	14	13	0
Landvettervägen	16	19	16	14	2	32
Tuevägen	8	6	8	8	4	22
Norrleden	26	26	22	30	0	34

Tabla 18. Cambios en el volumen de tráfico en ciertas carreteras colindantes al cordón. Fuente: (Börjesson & Kristoffersson, 2015).

#### 4.5.4 Efectos de la tasa por congestión en el tiempo de viaje

Como era de esperar, la tasa por congestión de Gotemburgo también originó, tras su aplicación, efectos significativos en el tiempo de viaje. En la Figura 34 se muestran algunas de las carreteras y enlaces donde se analizaron los tiempos de viaje, antes y después del funcionamiento de la tasa. Estos viales se clasificaron en diferentes categorías: arterias internas (enlaces más cercanos al eje de la autopista y que se muestran en figura en un color más oscuro), arterias externas (enlaces que se muestran en la figura en color gris), calles interiores al cordón y “bypasses” no mostrados en la figura.



Figura 34. Carreteras y enlaces donde se analizaron los tiempos de viaje antes y después de introducir la tasa por congestión. Fuente: (Börjesson & Kristoffersson, 2015).

La Figura 35, por tanto, muestra los resultados del análisis del tiempo de viaje, respecto al flujo libre, durante el periodo de 7:00-8:00h en las cuatro categorías viales. El valor del 0% corresponde al tiempo de viaje en flujo libre, mientras que un valor del 100% indica un aumento del tiempo de viaje del doble del de su flujo libre. Se observa que, tras el funcionamiento del peaje urbano, la congestión en las arterias internas se redujo significativamente, aunque el ahorro de tiempo de viaje fue limitado; debido a que el tiempo medio de desplazamiento durante ese periodo temporal era bajo, aproximadamente de unos 5 minutos. En el caso de las arterias externas y calles interiores al cordón, la reducción de la congestión fue inferior a la observada en las arterias internas, en parte debido a los bajos niveles de congestión que estas vías tenían previamente al peaje. Por último, a pesar del aumento del flujo de tráfico, los tiempos de viaje en los “bypasses” permanecieron sin cambio lo que indicaba que la capacidad vial fue suficiente.

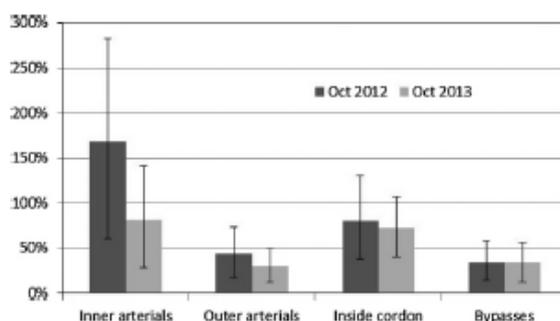


Figura 35. Aumento relativo en el tiempo de viaje durante las horas pico de la mañana 7:00h-8:00h para diferentes categorías de carreteras. Fuente:(Börjesson & Kristoffersson, 2015).

#### 4.5.5 Cambio de hábitos de viaje e incremento en el uso del transporte público

La ciudad de Gotemburgo publicó en el año 2013 un estudio (City of Gothenburg, 2013) donde analizó el cambio de los hábitos de viajes generados por la tasa por congestión. El estudio, soportado por diferentes encuestas realizadas en la región, concluyó que gran parte de los encuestados, que hacían sus viajes en vehículo privado antes del funcionamiento del peaje urbano, fueron balanceados hacia el transporte público lo que generó un cambio en sus hábitos viaje.

La Tabla 19 muestra la variación del número de viajes por modo de transporte y tipo de viaje entre los años 2012 y 2013. Podemos observar cómo los viajes en automóvil, tanto internos como discrecionales a la ciudad de Gotemburgo, tuvieron una variación similar del nueve y siete por ciento, respectivamente. Sin embargo, mientras la reducción de los viajes internos se transfirió, en general, al transporte público; la reducción de los viajes discrecionales parece ser que no lo hizo. Una de las hipótesis pudo ser que estos viajeros cambiaron de destino o redujeron su frecuencia de viaje.

El estudio también intentó investigar el impacto que tuvo la tasa por congestión en el uso de la bicicleta, pero, debido las fuertes heladas en Gotemburgo durante el periodo de toma de muestras, no se pudo observar ningún impacto medible.

En todo caso, los resultados obtenidos en Gotemburgo sobre los cambios de hábitos y el aumento del uso del transporte público fueron similares a los observados en Estocolmo donde tampoco se vieron variaciones en la cuota de viajes en bicicleta.

	Total 2012	Total 2013	Change	Change (%)
<i>Commuting</i>				
Car	101,000	92,000	-9000	-9
Public transport	49,000	61,000	12,000	24
Cycle	14,000	8000	-5000	-36
<i>Discretionary</i>				
Car	124,000	115,000	-9000	-7
Public transport	79,000	73,000	-6000	-8
Cycle	8000	7000	-1000	-13

Tabla 19. Viajes por modo de transporte y tipo de viaje en los años 2012 y 2013. Fuente:(Börjesson & Kristoffersson, 2015).

#### **4.5.6 Ingresos y costes del sistema**

La tasa por congestión en Gotemburgo generó unos ingresos brutos de 72 millones de euros durante su primer año, por debajo de los 93 millones de euros que predijo el modelo de transporte de Sampers (Björklind et al., 2014). Si comparamos estos ingresos con los que obtuvo el peaje urbano de Estocolmo (ver Tabla 15) observamos que son similares. Cabe recordar que Gotemburgo tiene un tamaño considerablemente menor que Estocolmo, además la tasa por congestión que se aplicó en Gotemburgo fue inferior; ambos factores implican que la tasa por congestión de Gotemburgo fue asumida por un mayor porcentaje de la población en comparación con Estocolmo. Una explicación plausible de la mayor recaudación del peaje urbano en Gotemburgo pudo ser por motivada por la menor contribución del transporte público a la movilidad de la ciudad.

En cuanto a la subestimación de ingresos prevista por el modelo de Sampers, aparentemente existieron dos razones principales. Primero, los analistas asumieron que el tráfico a través del cordón aumentaría un 1,2% anual en el ciclo temporal 2008-2013. Sin embargo, debido al fuerte aumento de los precios del combustible y la recesión económica en ese período, el tráfico disminuyó de media un 0,7% anual. En segundo lugar, el esquema tarifario de múltiples pases, que permitía pagar una vez siempre que se entrara y saliera durante un periodo de 60 minutos, generó ingresos inferiores a los previstos por el modelo.

En el año 2013 se incluyeron en la recaudación del peaje urbano los ingresos relativos a las sanciones del pago tardío de la tasa por congestión, esto supuso añadir 8 millones de euros a la recaudación de ese año que sumo un monto de 13 millones de euros. A pesar de ello los ingresos totales recaudados fueron todavía inferiores al objetivo previsto del primer año, lo que implicaba que sería necesario una extensión del periodo de amortización del proyecto.

Por último, indicar que en el año 2013 los costes operativos del sistema de peaje urbano de Gotemburgo, incluyendo los costes de mantenimiento del sistema, costes de atención al cliente y costes de facturación fueron de aproximadamente 12 millones de euros, lo que representaba aproximadamente un 17% de los ingresos.

#### **4.5.7 El proceso político y el referéndum del año 2014**

Al igual que en Estocolmo, antes de que se introdujera la tasa por congestión en Gotemburgo el apoyo político de la medida fue muy bajo, de la misma manera que lo fue en otras ciudades del mundo. Sin embargo, durante los últimos años, en ambas ciudades suecas la controvertida medida ha sido completamente aceptada por la mayoría de los partidos políticos. Este amplio apoyo político, en el caso de Suecia, no se ha debido únicamente al apoyo ciudadano, sino que en gran parte al papel clave que la tasa por congestión ha desempeñado a la hora de negociar las ayudas económicas nacionales para las inversiones de transporte.

Antes de la puesta en funcionamiento de la tasa por congestión de Estocolmo, la región tenía miedo a que si aplicaba la medida pudiera perder las ayudas económicas nacionales, dirigidas a promover proyectos de infraestructuras de transporte. Por ello, a finales del año 2007, el Gobierno sueco y el Gobierno regional de Estocolmo acordaron un importante paquete de inversiones en infraestructuras del transporte que sería financiado en un 50% con los ingresos generados por el peaje urbano de Estocolmo y el resto por el Gobierno nacional.

El acuerdo alcanzado entre el Gobierno Sueco y la región de Estocolmo representó un punto de inflexión en el apoyo político hacia la tasa por congestión. Antes del convenio, en Suecia, las principales inversiones de infraestructuras de transporte se financiaban mediante subvenciones nacionales. Posteriormente al acuerdo de Estocolmo, Suecia preparó un plan nacional de inversiones para el periodo 2010-2021 donde declaró prioritarias todas aquellas inversiones con cofinanciación regional, así como aquellas inversiones metropolitanas que tuvieran rentabilidad.

A pesar del nuevo plan nacional, los políticos locales y regionales de Gotemburgo consideraron que los fondos nacionales que recibirían para financiar sus proyectos de infraestructuras de transporte no eran suficientes. Por tal razón, en la primavera del año 2009, representantes del Gobierno nacional, los Gobiernos regionales de la Región de Västra Götaland y de Halland, la Asociación de autoridades locales de la Región de Gotemburgo (GR6) y el Gobierno local de la ciudad de Gotemburgo iniciaron una serie de negociaciones para acordar un nuevo paquete de inversiones en infraestructuras de transporte cofinanciado por la región. Este proceso, que fue informal y careció de oficialidad, involucró a un pequeño número de negociadores de cada una de las partes interesadas. El resultado de estas negociaciones, anunciadas a finales de agosto del año 2009, dio como resultado una amplia coalición política entre los Gobiernos regionales y nacionales fruto de la cual se acordó un paquete de inversiones financiadas, en parte, con los ingresos recaudados por el peaje urbano de Gotemburgo.

El presupuesto total del acuerdo, que fue finalmente aceptado el 1 de abril de 2010, tuvo un importe de 3.4 billones EUR de los cuales 1.7 billones EUR corresponderían al Gobierno nacional, 1.4 billones EUR a los ingresos por los cánones del peaje urbano (el 33% pagados por los ciudadanos de la ciudad de Gotemburgo), 0.125 billones EUR a la ciudad de Gotemburgo, 0.1 billones EUR a las regiones que rodean Gotemburgo y 0.75 billones EUR a la revalorización del precio del suelo. Dentro del paquete de inversiones se incluía la ejecución del West Link<sup>44</sup> (2.0 billones EUR), así como construcciones de nuevas carreteras y mejoras en el transporte público.

---

<sup>44</sup> West Link: es el proyecto de construcción de un enlace ferroviario bajo el centro de Gotemburgo, de dudosa viabilidad, con una longitud total de 8 km y que cuenta con un túnel de 6 km con el objetivo de aumentar la capacidad ferroviaria.

## Referéndum 2014

La resistencia ciudadana a la tasa por congestión de Gotemburgo dio lugar a que el periódico Göteborgs-Tidningen organizara una petición ciudadana, que fue firmada por 90.000 gotemburgueses, donde solicitaban la celebración de un referéndum que les permitiera decidir sobre el futuro del peaje urbano. Esta petición desencadenó que, el 5 de septiembre de 2013, el Ayuntamiento de Gotemburgo decidiera organizar un referéndum consultivo el 14 de septiembre de 2014, coincidiendo con las elecciones generales del país. Sin embargo, la aprobación del referéndum no contó con un consenso político unánime y ciertos partidos, entre ellos los socialdemócratas, votaron en su contra. A pesar de ello, el referéndum finalmente se celebró formulando la siguiente pregunta:

¿Crees que la tasa por congestión debería continuar después de las elecciones de 2014?

El 57% de la población votó “No “. Puesto que el referéndum fue sólo consultivo el Gobierno de coalición municipal, integrado por los socialdemócratas, ignoraron el resultado y mantuvieron el peaje urbano.

Ante estos resultados nos preguntamos: ¿Por qué mientras que en el referéndum de Estocolmo hubo una gran mayoría de ciudadanos que votaron a favor de la tasa, en Gotemburgo fue rechazada? Una de las posibles explicaciones a esta pregunta pudo ser debida a que Gotemburgo tenía una menor red de transporte público municipal y un inferior nivel de congestión. Estos factores hacían que una gran parte de los viajes hacia Gotemburgo se hicieran en vehículo privado, por lo que la mayoría de la población se veía afectada por la tasa, sin que recibieran beneficios significativos en la reducción del tiempo de viaje. Otra posible explicación pudo ser debida a que la tasa por congestión de Gotemburgo se vio más como un instrumento de recaudación de impuestos para financiar proyectos de infraestructuras, que como una medida que mejoraría la calidad de vida de sus residentes.

Estas hipótesis intentaron contrastarse con la realización de encuestas ciudadanas. En la Figura 36 se muestra gráfico con la evolución temporal de la opinión ciudadana sobre la tasa por congestión y la ejecución del West Link. Las encuestas reflejaron como diferían las opiniones de los encuestados que residían dentro de la ciudad de Gotemburgo frente a los que residían fuera. Si bien, en lo referente a la tasa por congestión los residentes de la ciudad de Gotemburgo estaban más a su favor que los no residentes, el apoyo al proyecto West Link fue sustancialmente más bajo en el municipio de Gotemburgo que en el exterior de la ciudad. Podemos también apreciar como el apoyo ciudadano a la tasa por congestión fue en aumento desde su introducción pasando de tener un apoyo de alrededor el 30%, justo antes de su puesta en funcionamiento, hasta el 50% un año después de su puesta en marcha. Dentro de este apoyo se observó que, entre los residentes de la ciudad de Gotemburgo, los que residían en el centro de la ciudad estaban más de acuerdo con la tasa que el resto.

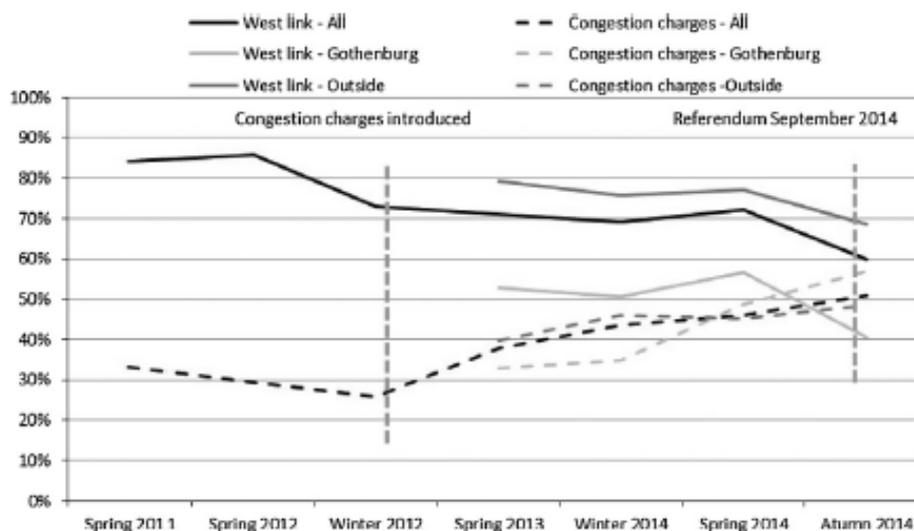


Figura 36. Encuestados a favor de la tasa por congestión y el West Link en Gotemburgo. Fuente: (Börjesson & Kristoffersson, 2015).

#### 4.5.8 Conclusiones

La implantación de la tasa por congestión en la ciudad de Gotemburgo logró reducir, durante el funcionamiento del peaje, un 12% el volumen de tráfico a través del cordón y un 9% en el centro de la ciudad. El peaje urbano de Gotemburgo consiguió que parte de los viajes, que se realizaban en vehículo privado, se transfirieran hacia el transporte público. Por otro lado, se observó que los viajes discrecionales se adaptaron al canon reduciendo su frecuencia de viajes y cambiando destinos.

A pesar de las diferencias entre la ciudad de Gotemburgo y Estocolmo podemos decir, que, en líneas generales, los efectos y mecanismos de adaptación observados en ambos peajes mostraron patrones similares (Eliasson et al., 2009). Sin embargo, existieron distinciones importantes en los resultados obtenidos como consecuencia de sus diferencias en los porcentajes de transporte público urbano, niveles de congestión, topologías de red e incluso en los objetivos por los que se implementó la tasa por congestión. Las diferencias topológicas demostraron la importancia de adaptar el diseño del peaje urbano a las características locales de la ciudad. En Gotemburgo, inicialmente se pensó que sería fácil copiar el diseño del sistema de Estocolmo y trasladarlo a Gotemburgo, pero posteriormente se demostró que las diferencias entre ambas ciudades hacían difícil extrapolar el sistema.

Por lo que respecta al apoyo ciudadano del peaje urbano, como ya se ha dicho, en Gotemburgo su soporte fue inferior al de Estocolmo. Uno de los principales motivos podría haber radicado en la menor cuota de transporte público de Gotemburgo en comparación con Estocolmo, que no proveía suficientes opciones a los viajeros de vehículos privados para transferir sus viajes hacia el transporte público. Otro factor pudo haber sido los menores niveles de congestión de Gotemburgo, que implicaban menores beneficios en términos de ahorro de tiempo de viaje para sus conductores.

La tasa de congestión de Estocolmo fue vendida a la ciudadanía como una medida que pretendía mejorar el entorno urbano y reducir la congestión de la ciudad, sin debatir el uso que se haría con los ingresos recaudados. Por el contrario, en Gotemburgo, el peaje urbano se vendió como un instrumento para generar ingresos que serían empleados para financiar proyectos de infraestructuras de transporte como el enlace ferroviario de West Link, de escasa rentabilidad. Esta circunstancia sumada a los escasos beneficios del peaje observados por la población, como en la reducción de la congestión, pudieron haber sido las razones por las que en Gotemburgo la medida tuvo una menor aceptación social que en Estocolmo.

En conclusión, desde un punto de vista político, la tasa por congestión se forjó a raíz de un amplio y fuerte apoyo institucional que fue clave para ponerla en funcionamiento. Sin embargo, la opinión pública y los beneficios obtenidos por el sistema no fueron factores críticos para su puesta en marcha, como si lo fueron en Estocolmo.

#### **4.6 Breves conclusiones sobre la experiencia internacional en peajes urbanos**

La experiencia internacional en peajes urbanos cuenta con una cierta tradición, desde la inauguración en el año 1975 del peaje urbano de Singapur hasta tener, en la actualidad, más de una decena de ejemplos en funcionamiento. Sin embargo, su número es aún reducido para poder extraer conclusiones estadísticas de sus resultados. De hecho, hasta ahora, no existe un estudio o manual definitivo que explique su aplicabilidad en ciudades.

Podemos decir que los peajes urbanos, a través de la tasa por congestión, han introducido por primera vez el concepto de pago por uso del viario urbano. Estos sistemas constituyen hoy en día uno de los instrumentos más esperanzadores para regular la entrada de vehículos en las ciudades, dada la flexibilidad y versatilidad que les otorga la tecnología disponible. Probablemente, de ahí su importancia, los peajes urbanos componen un sistema probado que logra intervenir con éxito la reducción de la congestión urbana, transfiriendo las externalidades generadas por el vehículo privado a sus usuarios.

Ciudades como Singapur, Londres o Estocolmo, entre otras, ya han implantado con éxito peajes urbanos que han logrado reducir la congestión y mejorado la calidad ambiental en sus centros urbanos. Además, en los países nórdicos, donde el peaje urbano es más habitual, han utilizado la medida como un instrumento fiscal para generar ingresos que han sido utilizados en la financiación de proyectos de infraestructuras de transporte.

Vistos y analizados los casos más significativos de peajes urbanos existentes, vale la pena preguntarse si la experiencia de cada una de estas ciudades se puede transferir a otras. Autores como (Eliasson et al., 2012) y (Börjesson & Kristoffersson, 2015) indican que la respuesta es más bien un “tal vez” que un “sí”. El motivo es que cada ciudad tiene diferentes diseños urbanísticos, sistemas diferentes de transporte, por no

mencionar diferencias socioeconómicas y geográficas, así como diferentes circunstancias políticas que hacen que las normas que han funcionado en una ciudad puedan no funcionar en otras.

No obstante, dicho lo anterior, se ha podido comprobar que existen ciertos puntos que pueden influir en el éxito de la puesta en marcha de una medida como el peaje urbano. Además del apoyo social, uno de los más importante es la voluntad política. En el caso de Londres, su alcalde tuvo desde el inicio un claro compromiso político con el peaje urbano, también pasó algo parecido en Gotemburgo. Sin embargo, en la ciudad de París, la medida no fructificó por la oposición de su alcalde Bertrand Delanoë que creía que generaría efectos perversos en la segregación social (Santos, 2006). En la misma línea, en Nueva York se abandonó la idea por la fuerte oposición política que se generó, pese a que en 2019 el Gobernador Andrew Cuomo volvió a reconsiderar la medida.

En definitiva, podemos concluir que, en general, para que un proyecto como el de un peaje urbano acabe implantándose finalmente en una ciudad debe llevar consigo un fuerte apoyo social y político. Utilizar los beneficios generados por el peaje urbano en proyectos que mejoren, por ejemplo, el sistema de transporte público de la ciudad, junto con la reducción de la congestión y mejora de los tiempos de viajes que estos sistemas suelen provocar, puede hacer que la medida gane popularidad.

## **5. MARCO TEÓRICO DE LA TARIFICACIÓN VIAL**

### **5.1 Introducción**

La teoría económica de la tarificación vial se remonta a Pigou (1920) y Knight (1924), que escribieron sobre la mala distribución de los recursos en el caso de viarios públicos de acceso libre. Las razones fundamentales detrás de este fenómeno son las llamadas externalidades: si hay congestión, cada usuario de la vía es forzado a disminuir su velocidad, por tanto, los tiempos de viaje se alargan. En ausencia de un peaje, el conductor no paga por los costes adicionales que genera a los demás. Cuando este coste se ignora, el mercado falla. La situación se puede mejorar aplicando políticas correctoras como un peaje que debería vincularse a las externalidades generadas (Rouwendal & Verhoef, 2006).

La cuestión fundamental de la tarificación de las infraestructuras de transporte fue formulada durante un debate entre Pigou y Knight. Este debate, que fue de enorme interés, no sólo produjo algunas definiciones y herramientas, sino que también abrió el camino a una discusión fundamental que todavía está hoy entre nosotros: ¿Se debe regular la congestión a través de políticas públicas (impuestos y regulación) o mediante transacciones privadas entre las partes interesadas, o por el contrario con nada en absoluto? (Pahaut & Sikow, 2006).

La principal motivación económica para la introducción de un peaje vial es que se mejora la eficiencia económica. En la definición del óptimo de Pareto, es imposible mejorar el bienestar social de un actor sin disminuir el de otro. Una situación donde la externalidad del coste de la congestión no esté interiorizada no sería pues eficiente según Pareto. Aquí surge un primer problema: pocas personas consideran que la introducción de una tarificación vial sea un medio para aumentar su bienestar. Otros temas importantes son la relación entre las inversiones en infraestructura y el peaje óptimo a aplicar (Mohring, Herbert and Harwitz, 1962); (Keeler, T.E and Small, 1977) y la dinámica de las colas en los cuellos de botella durante las horas pico (Vickrey, 1969); (Arnott, Richard; de Palma, André; Lindsey, 1993).

La tarificación vial por congestión ha sido una herramienta de gestión de tráfico ampliamente recomendada por economistas, ingenieros de transporte y técnicos vinculados profesionalmente con la planificación urbana y los sistemas de transporte. Sin embargo, existen estudios teóricos y evidencia empírica que destacan los potenciales efectos adversos de este tipo de política pública cuando se usan para regular el uso excesivo del automóvil (de Grange & Troncoso, 2015). (Lave, 1994) ya advertía a mediados de la década de los noventa sobre la complejidad del problema.

Los argumentos teóricos a favor de la tarificación vial se sustentan con el principio microeconómico de que aquellos bienes cuya producción o consumo generan externalidades negativas tienden a ser sobre producidos (o sobre consumidos), y que una manera eficiente de lograr una producción y consumo socialmente óptimo es la creación de impuestos pigouvianos.

(Lo & Hickman, 1997) destacan ciertas ventajas de la tarificación vial ya que permiten: (i) internalizar los costos de las externalidades negativas del uso excesivo del automóvil; (ii) captar ingresos que pueden ser asignados a proyectos de transporte (público o privado); y (iii) recolectar información que puede ser usada en la gestión del tráfico y en el diseño de nuevas políticas de transporte.

Sin embargo, estos conceptos no implican que cualquier esquema de tarificación vial se traduzca, necesariamente, en mayores beneficios sociales. (David Levinson, 2010) plantea que la mayoría de los análisis cuantitativos relacionados con los impactos de la tarificación vial se han basado en el uso de modelos teóricos y simulaciones computacionales sobre sus efectos esperados, y no en análisis empíricos y de seguimiento (antes-después) en aquellos lugares donde se ha implementado la medida.

En un sistema con imperfecciones en el mercado del trabajo (por ejemplo, por las políticas de pago a la seguridad social y de impuestos sobre la renta) y con economías de aglomeración, los efectos de la congestión y los eventuales beneficios de una tarificación vial no van a ser capturados correctamente por un análisis aislado del mercado del transporte, como los que se utilizan normalmente (Parry & Bento, 2001). En general, no se suele considerar que hay otros mercados que se pueden ver afectados negativamente por la tarificación vial (análisis de equilibrio general en lugar de equilibrio parcial), tampoco los efectos redistributivos que puede generar tal medida (ganadores, perdedores y su proporción), ni la aceptación que pueda tener entre los distintos agentes que componen la sociedad (compensaciones).

Existe, en cualquier caso, abundante literatura a favor de implementar la tarificación vial por congestión para desincentivar el uso excesivo del automóvil, y también un amplio consenso técnico en torno a ella como herramienta positiva de gestión de la demanda en redes viales congestionadas. Después del trabajo pionero de (Pigou A.C., 1920), autores como (Walters, 1961) y (Vickrey, 1963) sentaron las bases para la fijación de un impuesto por el uso de la infraestructura de acuerdo con los costos de congestión. Más recientemente, esta idea volvió a cobrar fuerza en múltiples trabajos, tanto teóricos como empíricos (véase, entre otros, (M. J. Smith, 1979); (D. M. Newbery, 1990); (Hau, 1992, 1998, 2005); (Small, 1992); (Small, K; Gómez-Ibañez, 1998); (Nash, C. & Sansom, 2001); (De Borger, B. & Proost, 2001); (De Palma & Lindsey, 2011); (Anas & Lindsey, 2011); (Basso & Jara-Díaz, 2012). Una amplia revisión del estado del arte la presentan autores como (Palma, A. D., Lindsey, R., and Proost, 2006) y (Tsekeris, 2009).

Sin embargo, a pesar de la amplia justificación teórica, en muy pocas ciudades se han implementado políticas de precios que contemplen la internalización de los costos externos por el uso de la infraestructura. Las razones incluyen problemas asociados a los efectos redistributivos entre los distintos grupos afectados y a los bajos beneficios políticos esperados, en comparación con los altos costes políticos de implementarla. Por otra parte, tal como se ha dicho, los análisis de coste-beneficio asociados a la tarificación vial normalmente se concentran en el mercado del transporte. Para convencer a la sociedad haría falta un análisis

más completo, basado en el uso de modelos de equilibrio general<sup>45</sup> que contemplen la interacción con otros mercados, como el mercado laboral, o la heterogeneidad de los agentes afectados.

## 5.2 Tarificación por uso: análisis básico

El análisis de Pigou-Knight se ilustra en la (Figura 37)<sup>46</sup> y se inicia desde el hecho de que si aumenta el flujo de tráfico en una carretera aumenta el tiempo medio que se tarda en recorrer un determinado segmento. Este hecho lo representaría la línea de coste medio (AC). Esta línea proporciona el producto del valor de tiempo, que se supone constante entre los usuarios de la carretera, y el tiempo medio. Hay que tener en cuenta que la línea AC puede incluir los costes operativos del vehículo, aunque se ignoran por simplicidad. Por lo tanto, un viaje adicional aumenta el tiempo medio de viaje, lo que genera un coste social externo negativo que debe tenerse adecuadamente en cuenta. Dado que el conductor sólo experimenta costes adicionales de su propio tiempo de viaje, y no tiene en cuenta el efecto de su viaje en el tiempo de viaje de los demás, habrá una discrepancia entre el análisis que haga de su propio coste-beneficio y el de los costes y beneficios sociales para el conjunto de viajeros y, obviamente, para la sociedad que tendrá que absorber externalidades adicionales (contaminación, ruido, etc.). La línea MC del coste marginal muestra el coste marginal social, que incluye el coste de la congestión. Este último coste es igual al aumento del tiempo de viaje de todos los viajeros en forma conjunta, multiplicado por el valor del tiempo e igual a la distancia vertical entre MC y AC.

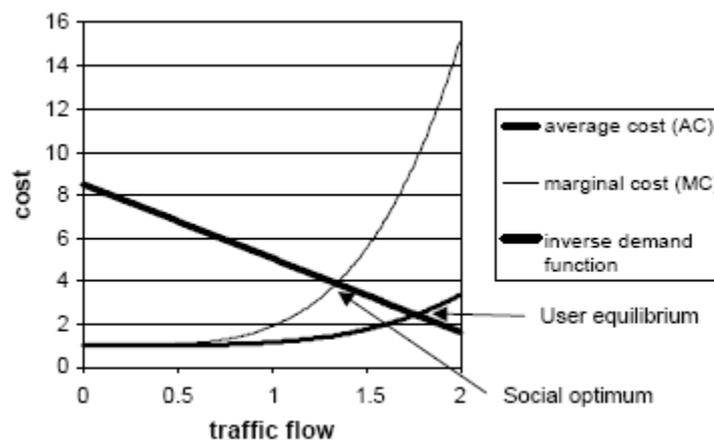


Figura 37. Análisis Pigou-Knight (Rouwendal & Verhoef, 2006).

El coste externo puede ser relativamente grande con respecto a la congestión experimentada por cada conductor. Esto se ilustra en las funciones AC y MC presentadas en la Figura 37 basándose en la

<sup>45</sup> Los modelos de equilibrio general tratan de dar una explicación global del comportamiento de la producción, el consumo y la formación de precios en una economía con uno o varios mercados.

<sup>46</sup> Originada por Walters (1961) es la forma convencional de ilustrar el análisis Pigou-Knight de una manera normalizada donde el coste de la velocidad en flujo libre y la capacidad se ha establecido igual a 1. El diagrama utiliza la función BPR donde  $t = 1 + 0.15(\text{flow}/\text{capacity})^4$  y una curva de demanda lineal que implica una elasticidad precio de  $e = -0.4$  en el equilibrio del usuario.

formulación del BPR<sup>47</sup>. La pendiente de la curva MC, mucho más pronunciada, sugiere que el coste marginal externo del tráfico es múltiplo del retardo experimentado por cada conductor individual.

La solución propuesta por Pigou-Knight fue confrontar cada viaje realizado con el coste que su comportamiento impone a otros viajeros, mediante la introducción de una tasa correctiva. El pago de esa tasa debería ser exactamente igual al valor monetario del tiempo de viaje adicional impuesto por cada conductor a otros conductores. Con esa tasa, los individuos analizarían correctamente el “coste-beneficio” de su propio viaje lo que implicaría una mayor eficiencia del sistema. El reto está ahora en el cálculo del beneficio social de la medida, o sea su eficiencia para la sociedad. La introducción de la tasa implica un cambio del punto de equilibrio para el usuario, que pasa del punto en que la curva de demanda cruza la línea de AC al punto donde la curva de demanda cruza la línea MC<sup>48</sup>, para conseguir el óptimo social.

La eficiencia de este sistema incrementaría con una reversión inteligente de los beneficios asociados a sus ingresos<sup>49</sup> para mejorar la movilidad. La introducción del peaje Pigouviano genera un nuevo precio de equilibrio (al menos cuando los conductores son homogéneos)<sup>50</sup>. Cuando los conductores son heterogéneos, la reducción en el tiempo de viaje es más valiosa para aquellos cuyo valor del tiempo es mayor. Es posible que este grupo se beneficie relativamente más de la introducción de un peaje o tasa por congestión. Este hecho puede dificultar la aceptabilidad de estas tasas.

Puesto que el efecto de un peaje o una tasa por congestión es negativo para la mayoría de conductores, estas medidas son políticamente difíciles de justificar salvo que se proponga una utilización convincente en la reversión de los ingresos recaudados por el peaje. Normalmente se busca la aceptabilidad de estos impuestos dedicando los recursos conseguidos, o una buena parte de ellos, a mejoras de la movilidad.

Debe tenerse en cuenta que la introducción de una tasa por congestión óptima no suele ser suficiente para eliminar la congestión por completo. Además, el efecto externo y, por lo tanto, el valor del peaje en general, en general, será mayor cuando haya más congestión, al hallarse siempre en la parte convexa de la función<sup>51</sup>. Esta propiedad de la solución al problema de externalidad (es decir, peajes más altos cuando la congestión empeora) es una razón importante para el disgusto público del peaje de congestión. Una análisis más detallado sobre los principios básicos de la tarificación vial podemos encontrarlo en (Rouwendaal & Verhoef, 2006).

---

<sup>47</sup> Bureau of Public Roads (1964). Fue una agencia federal de los EUA creada en 1964 con el objetivo, entre otros, de construir carreteras, así como estudios de transporte.

<sup>48</sup> La discusión que aquí se presenta se refiere sólo a la congestión. Existe otros tipos de costes en el mercado (tales como externalidades medioambientales) que también pueden ser abordados por impuestos o por tasas por congestión como se trata en la presente tesis.

<sup>49</sup> Estos ingresos podrían generar un beneficio social revertiéndolos a gasto público para mejorar ciertas infraestructuras o implementar sistemas inteligentes de transporte que mejoren la movilidad. Por otro lado, este gasto público implicaría una mejora de la economía.

<sup>50</sup> La razón es que el coste social de un viaje excede el coste del tiempo del conductor, que es igual al coste medio. La Figura 27 ilustra este punto. El equilibrio del mercado sin un peaje o tasa se produce en el punto donde la curva de coste promedio cruza con la curva de demanda. El óptimo social se produce donde la curva de coste social cruza con la curva de demanda. Una curva de demanda con pendiente negativa implica que el coste del viaje en el óptimo social debe ser mayor que en el equilibrio del mercado.

<sup>51</sup> De hecho, la convexidad es una condición suficiente pero no necesaria para que el peaje aumente con el volumen.

### **5.3 Aspectos a considerar en la tarificación vial**

Para (Bhatt, 1993), las principales barreras para implementar esquemas de tarificación vial se relacionan con las inequidades, entre distintos sectores geográficos o grupos afectados, en la distribución de los costes y beneficios que esta medida produce, por lo que el diseño de mecanismos compensatorios es un elemento central para impulsarla.

(King et al., 2007) plantean que la factibilidad política de la tarificación vial depende principalmente de qué grupos se verán beneficiados con las recaudaciones obtenidas. Argumentan que cobrar por el uso de calles congestionadas genera la oportunidad de reinvertir en la misma ciudad en la que se está implementando el cobro, mejorando con ello la percepción de los usuarios del sistema.

(Steg, L. and Schuitema, 2007) describen algunas condiciones en las cuales el efecto de la tarificación vial puede ser más efectivo en la reducción del uso del automóvil. La principal es la existencia de un transporte público de alta calidad (como en Londres y Singapur), de tal forma que sea una alternativa real para el automovilista. Debido a que la demanda o disposición a pagar por usar el automóvil depende, además del coste monetario de usar el vehículo, de los costes generalizados de las otras alternativas de transporte indican que un buen transporte público aumenta la elasticidad del automovilista, generando con ello una mayor disposición a cambiar su comportamiento frente a la tarificación vial. Sin embargo, si el automovilista no considera el transporte público como alternativa, simplemente puede percibir la tarificación vial como un impuesto adicional que no genera beneficios claros, con la consecuente reprobación de esta medida. Por lo tanto, un buen transporte público pareciera ser una precondition para que la tarificación vial sea viable.

(Richards, 1992) propone considerar ocho aspectos relevantes para el diseño e implementación de una correcta política de tarificación vial:

1. Impacto sobre la demanda: debe preverse los efectos directos e indirectos sobre el comportamiento de los automovilistas afectados por la tarificación vial. Esto implica anticipar potenciales cambios de ruta, de destino de viaje, de horario o incluso de modo de transporte.
2. Impacto sobre la oferta: debe preverse cómo cambian los niveles de oferta tanto en el sector tarificado como en los restantes sectores, horarios y modos de transporte, a fin de estimar si es necesario efectuar ajustes de oferta.
3. Impacto sobre la economía urbana: debe estimarse el efecto sobre el comercio detallista, sectores financieros y de servicios, y también sobre los bienes inmuebles al interior del sector tarificado, tanto en el corto como en el largo plazo.

4. Análisis de equidad: implica determinar cuáles son los grupos afectados por la medida (positiva y negativamente), así como la magnitud del impacto, mediante un análisis coste-beneficio desagregado por grupo de individuos.
5. Medioambiente y seguridad: se requiere estimar el impacto que la medida propuesta puede generar sobre los niveles de emisiones y contaminación, así como sobre la tasa de accidentabilidad.
6. Viabilidad financiera: se debe determinar cuáles son los costos de implementar y explotar la medida, y compararlos con los ingresos generados. Además, deben incluirse los eventuales cambios en los ingresos monetarios de los agentes involucrados; por ejemplo, la recaudación en transporte público, las ventas de combustibles y su respectivo efecto en la recaudación de impuestos.
7. Capacidad de fiscalización y cumplimiento: se debe determinar qué tan efectivo es el método de ejecución de la política propuesta, y cuál es su nivel de cumplimiento o morosidad de pago.
8. Tecnología: debe especificarse qué plataforma tecnológica debe implementarse para gestionar los cobros y su recaudación, y para facilitar los procesos de cobranza y de fiscalización.

Además, para hacer ciudadanamente aceptable una política de tarificación vial se debería:

- Identificar claramente los problemas existentes; estos deben ser visibles, y no haber sido resueltos con otras medidas tomadas anteriormente (por ejemplo, restricción vehicular).
- Transmitir los beneficios de la medida tanto al inicio de su aplicación como en el tiempo, mostrando los resultados esperados y alcanzados.
- Esperar el momento oportuno. Es muy difícil convencer a los votantes de pagar por un plan antes de que hayan visto sus beneficios. Sin embargo, el apoyo tiende a aumentar después de que la política opera en estado de régimen. Esto permite recomendar un aumento paulatino y progresivo de la política en el tiempo, incorporando así nuevas zonas o calles tarifadas, nuevos períodos, o eventuales aumentos de tarifas.
- Lograr que la medida sea percibida como justa por parte de los usuarios del sistema de transporte. Esto implica proteger o compensar expresamente a los grupos más vulnerables que puedan verse afectados por ella. De hecho, cuando en Singapur fue implementada la tarificación vial, se la acompañó de una reducción del impuesto a la compra de automóviles.
- Definir con anticipación en qué se reinvertirán los fondos recaudados. En Londres, los ingresos van al sistema de autobuses, mientras que en Oslo se utilizan para construir más carreteras. Una

falta de definición respecto del uso de los recursos obtenidos genera desconfianza por parte de los distintos grupos de interés, ya que no basta con indicar que se redujo la congestión. En Londres, previo a la puesta en marcha de la tarificación vial, la introducción de cientos de buses nuevos tuvo un impacto visible importante.

- Conseguir apoyo de líderes de opinión. Esto implica que no es suficiente contar con el respaldo de técnicos en la materia, sino que, además, se requiere sumar a líderes políticos, ambientales, económicos, etcétera, para lograr una mayor confianza en esta medida.

Sin embargo, antes de implementar una medida como la tarificación vial, debe mejorarse y optimizarse la gestión del tráfico en los sectores congestionados mediante nuevas tecnologías de información y sistemas de control vehicular dinámico para vehículos y peatones. De la misma forma, en el caso de una tarificación vial urbana, es importante que se regule el uso de espacios públicos como estacionamientos para los automóviles, ya que ello reduce la oferta vial y capacidad de las calles, principalmente por dos razones: resta un carril entero (que es el usado para estacionamiento); y, además, dificulta la circulación de los restantes vehículos cuando uno de ellos efectúa las maniobras para estacionarse (de Grange & Troncoso, 2015).

#### **5.4 Tasa por congestión óptima en función de la distancia y del tiempo de viaje**

La mayoría de los actuales esquemas tarifarios por congestión adoptan un patrón de tarifa plana, basadas en el paso del vehículo por una entrada (ej. Singapur o Estocolmo) o su acceso a un área determinada (ej. London o Milán). Estos tipos de patrones con tarifas planas, sin embargo, suelen ser inequitativos, porque subestiman los vehículos que realizan viajes largos dentro de un cordón y restringen excesivamente los que realizan viajes cortos y breves (Liu, Wang, & Meng, 2014). Por ello, una solución de tarificación basada en la distancia recorrida fue recomendada por (A. D. May & Milne, 2000) donde la tarifa se define con una función no decreciente de la distancia de viaje de un vehículo dentro de un área en cordón. Esta función se denomina función de peaje en distancia, cuya notación es  $\phi(\eta)$ , donde  $\eta$  es la distancia de viaje en un cordón.

Existen estudios anteriores sobre modelos de peaje basados en la distancia (Mitchell, Namdeo, & Milne, 2005) que asumieron que el peaje por distancia era linealmente proporcional a la distancia de viaje en una zona de peaje, es decir, que  $\phi(\eta)$  es una función lineal con intersección cero, lo que facilita el análisis. Sin embargo, según (Lawphongpanich & Yin, 2012), los esquemas prácticos de esquema de tarifas por congestión son a menudo no lineales, por lo que es racional pensar que  $\phi(\eta)$  es una función no lineal. Para facilitar la comprensión, se supone que  $\phi(\eta)$  es una función lineal por tramos con un pequeño número de tramos lineales, siendo más práctico y teniendo mayores ventajas que una función general de tasa por congestión no lineal (Wilson, 1993). Cabe destacar, que teniendo en cuenta las consideraciones racionales de los peajes por distancia, la “Land Transport Authority Singapore, (LTA)” ha decidido sustituir el actual

sistema de peaje basado en una tarifa fija a la entrada del peaje, por una tarifa basada en la distancia que previsiblemente entrará en vigor a partir del 2020 (LTA de Singapur, 2008).

Hay que decir que una tarifa de peaje basada en la distancia tiene sus propias limitaciones: los conductores usarían intencionalmente la ruta más corta después de entrar en el cordón para salvar el peaje, aunque esta ruta más corta estuviese muy congestionada. En cierta medida, viola el principio de tarifa de precios por congestión. Para remediar esta limitación, podemos agregar, además del peaje por distancia, un peaje en el tiempo. Sea  $t$  el tiempo de viaje de un vehículo dentro de un cordón de peaje, entonces su peaje-tiempo se define como  $\beta t$ , donde  $\beta$  es una tarifa independiente del flujo. Este nuevo modelo de peaje se denomina peaje conjunto por distancia-tiempo (JDTT-Join Distance and Time Toll) y fue desarrollado por (Liu et al., 2014). El modelo equivale a una suma ponderada de un peaje por distancia y un peaje por tiempo,  $\lambda_1\phi(\eta)+\lambda_2\theta(\eta)$ . El modelo JDTT es un caso más general del modelo del peaje por distancia.

Tal y como se ha dicho anteriormente, un esquema no lineal de tarifa por congestión basada en la distancia es un caso especial de una solución de un problema (JDTT) donde el parámetro peaje-tiempo es  $\beta=0$ . El concepto de tarifa por distancia no lineal ha sido ampliamente usado en muchos sistemas de transportes, por ejemplo, tarifas de autobuses basadas en distancia o zona (Daskin, Schofer, & Haghani, 1988); tarifas en carreteras privadas (J. Y. T. Wang, Lindsey, & Yang, 2011). Sin embargo, la literatura es limitada con relación a los peajes urbanos por congestión basados en una tarifa por distancia no lineal. (Lawphongpanich & Yin, 2012) realizaron un trabajo preliminar suponiendo que la función de peaje por distancia  $\phi(\eta)$  es una función lineal a tramos definidos en una red de transportes donde se aplica un peaje por congestión basado en cordón. (Liu et al., 2014) propusieron un MPEC (mathematical program with equilibrium constraints) mediante SUE<sup>52</sup> para un peaje óptimo basado en una distancia no lineal, usando también una función lineal a trozos como aproximación, que lo aplican en el área "Ochard road cordon" del peaje urbano de Singapur, ver Figura 38.

---

<sup>52</sup> *Stochastic User Equilibrium (SUE)* es un modelo de asignación de transporte para elecciones de ruta que, a diferencia del modelo propuesto por Wardrop, cada conductor define el coste de viaje individualmente en lugar de utilizar una sola definición de costes aplicable a todos los conductores.

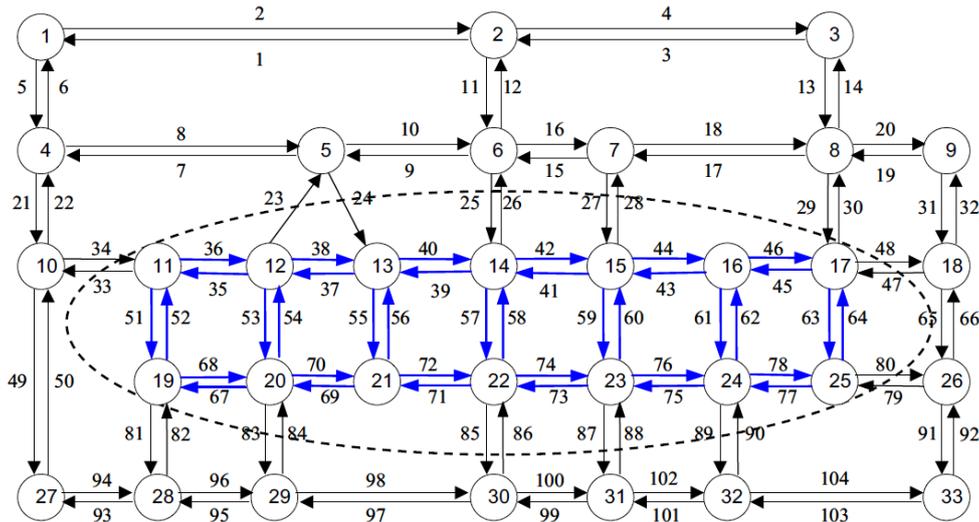


Figura 38. Ejemplo de estructura de red “Ochard Road”. Fuente: (Liu et al., 2014).

La elipse marcada en la Figura 38 es el peaje en cordón de 33 nodos y 104 enlaces. El área de peaje tiene 11 entradas y 11 salidas, por tanto 110 pares entrada-salida. Los parámetros óptimos aplicados en el nuevo método son los marcados en negrita en la Tabla 20. En la Figura 39 se muestra gráfico con el peaje óptimo calculado según la distancia recorrida del viaje.

Value of $\beta$	$y_0$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$Obj_{SSO}^*$
0.00	1	3	3	4	5	948,578
0.10	1	3	3	4	4.5	946,779
0.20	1	2	2	2.5	3.0	945,390
<b>0.30</b>	<b>1</b>	<b>1.5</b>	<b>1.5</b>	<b>2.0</b>	<b>2.0</b>	<b>941,622</b>
1.00	1	1.0	1.0	2.0	2.5	943,350

Tabla 20. Valores óptimos peajes por distancia. Fuente: (Liu et al., 2014).

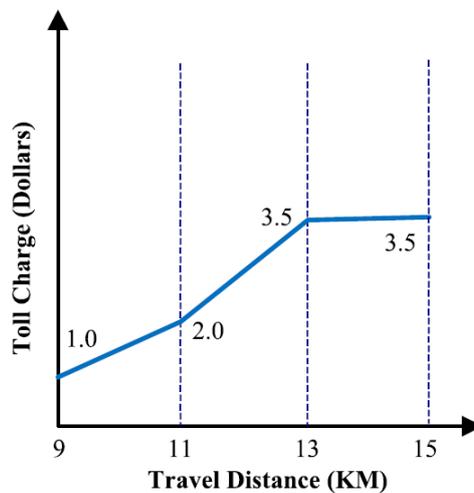


Figura 39. Óptimo peaje por distancia. Fuente: (Liu et al., 2014).

## **5.5 El peaje como elemento de gestión eficiente de la movilidad**

Las infraestructuras de transporte no tienen una capacidad finita, lo que hace que la congestión sea inevitable. Pero esta congestión se puede controlar e intentar conseguir un nivel óptimo de congestión, con un flujo de tráfico, que permita un uso más eficiente de la infraestructura. Dentro de las funciones objetivo que, en general, suele utilizar la Administración cuando trata de implementar un peaje para controlar la congestión se encuentran: la maximización del bienestar social, la maximización de los ingresos y el mejoramiento de la equidad, mientras que para el usuario de la carretera su objetivo particular es la minimización del coste generalizado de su viaje (Salas Rondon, Miller Humberto; Robusté, F; Sauri, 2009).

Para analizar el impacto del peaje en los flujos de tráfico es preciso establecer cómo éste afecta a los costes generalizados que se utilizan en el modelo de demanda. Para el caso concreto de un peaje urbano podríamos ligar el pago de su tasa a recibir un servicio de mayor calidad. Esto es un concepto relativamente novedoso. Los criterios de tarificación adoptados para los peajes de carretera han obedecido principalmente a su uso como herramienta de financiación para la construcción de determinados tramos de la red, aunque en los últimos tiempos se han utilizado cada vez más también como mecanismo para la internalización de los costes externos y el control de la congestión. En el caso de un peaje urbano, lo lógico sería desvincular la tarifa de la financiación y asociarla al servicio recibido por el usuario y a las externalidades que genera, usando criterios, como, por ejemplo:

- El tiempo ahorrado entre una vía rápida de pago y una vía alternativa gratuita.
- Las emisiones generadas por el vehículo, vinculando la tarifa a la situación vigente en la ciudad, de manera que el peaje aumentaría en los días de mayor nivel de contaminación ambiental.

Aunque hay otros factores que pueden incidir en la decisión del usuario, como:

- El incremento de seguridad entre una vía rápida de pago y una vía alternativa gratuita
- El incremento de fiabilidad del tiempo de viaje entre una vía rápida de pago y una vía alternativa gratuita.

También existen otros aspectos que podrían tenerse en cuenta a la hora de establecer la tarificación del sistema:

- Tipología del vehículo (en cuanto a ocupación de la vía: moto, automóvil, furgoneta, camión...).
- Ocupación de los vehículos.
- Uso (intensidad/capacidad) de la vía rápida de pago, que se ve reflejado en la variación horaria de flujos de vehículos.
- Efecto red.
- Alternativas de movilidad con otros modos de transporte.
- Vehículos de servicios públicos (ambulancias, coches de policía, taxis, camionetas de reparto, etc.).

- Impacto ambiental del vehículo.
- Particularidades del usuario (minusválido, extranjero, etc.).

Efectivamente, es posible ligar una tarifa de peaje a un servicio de calidad recibido y vincular su precio con diferentes factores. No obstante, no habrá que perder de vista como esa tarifa debe logra maximizar el bienestar social y que nivel de ingresos será necesario para se pueda cumplir son esa finalidad.

### 5.5.1 Maximización del bienestar social

Algunos autores señalan que la manera más eficiente de operar una infraestructura viaria es dejando que ésta sea de libre acceso, al menos hasta el punto en el que su uso no llegue a un cierto nivel de congestión. De una forma u otra, la sociedad debe pagar el coste de la infraestructura y éste apenas varía marginalmente con su uso, una mayor cantidad de personas se benefician de ella si no existe la imposición de un peaje, aumentando el bienestar social. Lo anterior es válido (previo análisis coste-beneficio) en casos donde haya la posibilidad de un aumento de la capacidad viaria sin costes excesivos, pero, en zonas urbanas o metropolitanas donde resulta difícil y costoso este tipo de medidas, es el peaje (establecido a nivel óptimo) el instrumento apropiado para la gestión de la demanda y el mantenimiento o mejora del bienestar social previo a la congestión.

Una forma de obtener el peaje óptimo es establecer como función objetivo la maximización del beneficio social neto. Para ello se tiene que la tasa de viajes  $v_{ij}$  entre cada par  $ij \in W$  es una función que depende del coste generalizado del viaje, es decir:

$$v_{ij} = D_{ij}(C_{ij}) \quad \forall ij \in W \quad (5.1)$$

Donde:  $C_{ij}$  es el coste del viaje para ir desde el origen  $i$  hasta el destino  $j$  y  $W$  es el conjunto de pares OD en toda la red. Existen diferentes rutas  $i$  y  $j$  por lo que  $C_{ij}$  está definido por el coste generalizado en la ruta escogida, expresada mediante la ecuación 5.2. En cualquier caso, el conductor optará por elegir la ruta que minimice el coste generalizado del viaje, de ahí que este coste se incluya en la función demanda como  $C_{ij} = \text{Min}[g_{ij}^r]$ .

$$g_{ij}^r = f_{ij}^r + v_t t_{ij}^r + \tau_{ij}^r \quad (5.2)$$

Donde:  $f_{ij}^r$  son los costes de operación vehicular (combustible, lubricantes, neumáticos, mantenimiento y reparaciones) dado en (€/viaje),  $v_t$  es el valor del tiempo (€/veh-h),  $t_{ij}^r$  es el tiempo medio que se precisa para realizar el viaje y  $\tau_{ij}^r$  son los gastos de peaje en que se incurre al viajar por la ruta  $r$  entre el par O-D  $ij \in W$ .

En forma general y tal y como se muestra en la Figura 40, el excedente del conjunto de viajeros (Eu) corresponde al beneficio de viajar en toda la red (área  $OABq^*$ ) y está dado por la expresión 5.3, donde

$D_{ij}^{-1}(\cdot)$  es la función inversa de la demanda  $D_{ij}(C_{ij})$  entre el par O-D  $ij$  ( $\forall ij \in W$ ), (Yang, H & Huang, 1998).

$$Eu = \sum_i \sum_j \int_0^{v_{ij}} D_{ij}^{-1}(\omega) d\omega \quad (5.3)$$

Al considerar solo el valor del tiempo, se tiene que el coste social total (Cst) en el que incurren todos los usuarios de la red, (área  $OEfq^*$ ) está dada por la ecuación 5.4.

$$Cst = v_t \sum_{a \in A} t_a(q_a) q_a \quad (5.4)$$

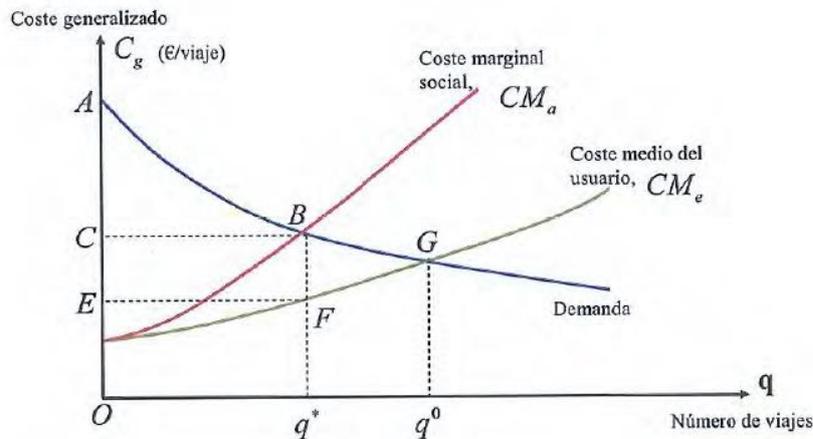


Figura 40. Tarifación basada en costes marginales bajo congestión. Fuente: (Salas Rondon, Miller Humberto; Robusté, F; Sauri, 2009).

Por ende, el bienestar neto ( $B_{ST}$ ) también llamado excedente social o beneficio económico neto, (área  $EABF$ ) se determina mediante la ecuación 5.5.

$$B_{ST} = E_u - C_{st} = \sum_i \sum_j \int_0^{v_{ij}} D_{ij}^{-1}(\omega) d\omega - v_t \sum_{a \in A} t_a(q_a) q_a \quad (5.5)$$

Entonces, esta función objetivo busca maximizar el área  $EABF$  mediante la aplicación del peaje gestor de la movilidad; es decir se requiere resolver la expresión:

$$\max B_{ST} = \max_{\tau} \sum_i \sum_j \int_0^{v_{ij}(\tau)} D_{ij}^{-1}(\omega) d\omega - v_t \sum_{a \in A} t_a(q_a(\tau)) q_a(\tau) \quad (5.6)$$

Sin embargo, mientras la administración pública lo que busca es reducir la congestión planteando una función objetivo que maximice el bienestar social, los usuarios buscan escoger la ruta óptima que les permita minimizar el coste del viaje. El problema de reducir este coste generalizado consiste en calcular los flujos en cada una de las diversas rutas alternativas que se encuentran en la red, lo que se convierte en la solución de un problema de equilibrio de demanda o problema de asignación de tráfico.

En problemas de asignación de tráfico se requiere definir una notación para representar la red de carreteras con un grafo dirigido  $\Gamma$  compuesto por un conjunto numerado de nodos  $N$ , un conjunto numerado de arcos  $A$  y el conjunto  $W$  de pares O-D  $ij$  (cada nodo  $i$  o  $j$  representa el origen o final de un viaje) que se unen a través de las distintas rutas en la red. Sean  $v$  la matriz de viajes origen-destino,  $v_{ij}$  el número de viajes entre el origen  $i$  y el destino  $j$  durante el periodo de análisis,  $\varphi_{ij}^r$  y  $g_{ij}^r$ , significan el flujo y el coste generalizado, respectivamente, sobre la ruta  $r$  que une el origen  $i$  y el destino  $j$ , tal que  $r \in R_{ij}$ , donde  $R_{ij}$  es el conjunto de rutas posibles entre el par O-D  $ij \in W$ . El problema se plantea dependiendo si la demanda es fija o variable.

### Demanda fija

Siguiendo las deducciones de (Sheffi, 1985) y haciendo las modificaciones respectivas, si el número de viajes  $V_{ij}$  entre cada par O-D  $ij$  es fijo y conocido, se tiene que el coste generalizado del viaje  $g_{ij}^r$  (€/viaje) en una ruta particular corresponde a la suma de los costes sobre cada arco que comprende dicha ruta, y se expresa mediante la ecuación 5.7.

$$g_{ij}^r = \sum_a \delta_{ij}^{ar} g_a \quad (5.7)$$

Donde:  $\delta_{ij}^{ar}$  es la variable binaria lógica que toma el valor 1 si la ruta  $r$  usa arco  $a$  y 0 en caso contrario. Con la expresión 5.8 se determina el coste generalizado  $g_a$  que depende de los costes de operación vehicular  $f_a$  (combustible, lubricantes, neumáticos, mantenimiento y reparaciones), del flujo  $q_a$  y del peaje  $\tau_a$  en el arco  $a \in A_\tau$ , donde  $A_\tau$  es el subconjunto de arcos de la red que tienen peaje tal que ( $A_\tau \subset A$ ).

$$g_a(q_a, \tau_a) = f_a + v_t t_a + \tau_a \quad \forall a \in A_\tau \quad (5.8)$$

Usando la misma variable binaria, el flujo en el arco  $q_a$  se expresa como una función de flujo en la ruta, mediante la ecuación 5.9, que recibe el nombre de *relación de incidencia ruta-arco*.

$$q_a = \sum_i \sum_j \sum_r \delta_{ij}^{ar} v_{ij}^r \quad \forall a \in A, \forall ij \in W \quad (5.9)$$

El problema de asignación es encontrar el vector de flujos en los arcos  $\mathbf{q}$ , que satisfaga el criterio de equilibrio de usuario cuando toda la matriz O-D ha sido asignada apropiadamente. Este modelo arco-flujo se obtiene resolviendo el siguiente problema matemático de minimización de restricciones, ecuación 5.10, que se conoce como transformación de Beckmann:

$$\min \mathbf{z}(\mathbf{q}) = \sum_{a \in A} \int_0^{q_a} g_a(\omega) d\omega \quad (5.10a)$$

Sujeto a:

$$v_{ij} = \sum_{r \in R_{ij}} \varphi_{ij}^r \quad \forall ij \in W \quad (5.10b)$$

$$q_a = \sum_i \sum_j \sum_r \delta_{ij}^{ar} \varphi_{ij}^r \quad \forall a \in A, \forall ij \in W \quad (5.10c)$$

$$\varphi_{ij}^r \geq 0 \quad \forall r \in R_{ij}, \forall ij \in W \quad (5.10d)$$

La ecuación 5.10b representa el conjunto de restricciones para la conservación del flujo, es decir, todos los viajes de la matriz O-D se asignan a la red. La no negatividad de la ecuación 5.10c asegura que la solución del programa matemático sea coherente.

### Demanda variable

El problema a solucionar consiste en hallar los flujos y el coste generalizado en los arcos, así como la matriz de viajes origen-destino que satisfaga la condición de equilibrio de usuario (UE). En equilibrio, los costes generalizados en las diferentes rutas entre cualquier par origen-destino son iguales y/o menores o iguales a los costes generalizados de las rutas sin usar. Estas condiciones son las que definen el equilibrio de usuario con demanda variable conocido también como *problema de equilibrio de usuario con demanda elástica*.

Al igual que en el caso de la demanda fija, se da que el programa de minimización equivalente al caso de demanda variable tiene solución única y se plantea mediante el programa matemático 5.11

$$\min z(\mathbf{q}, \mathbf{v}) = \sum_{a \in A} \int_0^{q_a} g_a(\omega, \tau) d\omega - \sum_i \sum_j \int_0^{v_{ij}} D_{ij}^{-1}(\omega) d\omega \quad (5.11a)$$

Sujeto a:

$$v_{ij} = \sum_{r \in R_{ij}} \varphi_{ij}^r \quad \forall ij \in W \quad (5.11b)$$

$$q_a = \sum_i \sum_j \sum_r \delta_{ij}^{ar} \varphi_{ij}^r \quad \forall a \in A, \forall ij \in W \quad (5.11c)$$

$$\varphi_{ij}^r \geq 0 \quad \forall r \in R_{ij}, \forall ij \in W \quad (5.11d)$$

Donde:  $D_{ij}(\cdot)$  es la función inversa de la demanda asociada con el par origen-destino  $ij$  y el vector  $\mathbf{q} = (\dots, q_{ij}, \dots)$ .

Volviendo a nuestro problema inicial de lograr que el uso de la red sea socialmente eficiente, se requiere resolver el siguiente problema anidado: (i) maximizar el bienestar social (*problema de nivel superior*) y (ii) minimizar el coste generalizado de los usuarios (*problema de nivel inferior*). La solución a este problema bi-nivel permitiría determinar de forma óptima para toda la red, los arcos a tarifar y la tarifa a cobrar. Esta combinación de funciones objetivos se plasma mediante el problema bi-nivel expresado en las ecuaciones 5.12 y 5.13.

*Nivel superior*: cuyo objetivo lo define el planificador del sistema de transporte.

$$\max_{\mathbf{B}} Bs_T = \max_{\tau} \sum_i \sum_j \int_0^{v_{ij}(\tau)} D_{ij}^{-1}(\omega) d\omega - v_t \sum_{\alpha \in A} t_{\alpha}(q_{\alpha}(\tau)) q_{\alpha}(\tau) \quad (5.12)$$

*Nivel inferior:* que representa el comportamiento de los usuarios en la red de transporte mediante un problema de asignación de tráfico. Para resolver este problema se requiere determinar las funciones  $q_{\alpha}(\tau), \forall \alpha \in A$  y  $q_{ij}(\tau), \forall ij \in W$

$$\min_{\mathbf{z}} z(\mathbf{d}, \mathbf{q}) = \sum_{\alpha \in A} \int_0^{q_{\alpha}} g_{\alpha}(\omega, \tau) d\omega - \sum_i \sum_j \int_0^{q_{ij}} D_{ij}^{-1}(\omega) d\omega \quad (5.13)$$

Para resolver este problema bi-nivel (expresiones 5.12 y 5.13), es necesario modelarlo como un problema aplicado de la planificación del transporte para que sea aceptado por la gran mayoría de la sociedad. En este caso, el uso de la “teoría de juegos no cooperativos”<sup>53</sup>, permite formular un modelo que represente las complejas iteraciones que se dan entre los diversos agentes participantes del mercado de transporte, cada uno de ellos con objetivos propios diferenciados. Los modelos de equilibrio aparecen como resultado de estas interacciones y su formulación matemática se fundamenta en modelos de optimización, desigualdades variacionales o formulación de tipo punto fijo, (Codina et al., 2013). Podemos tener dos tipos básicos de equilibrio: el denominado equilibrio de *Cournot-Nash* y el equilibrio de *Stacklberg* (Stackelberg, 1952), (Baar, T.; Olsder, 1982). A continuación, pasamos a describirlos:

#### - El equilibrio de Cournot-Nash o equilibrio del miedo

En la teoría de juegos, un “concepto de solución” para juegos con dos o más jugadores, el cual asume que cada jugador conoce y ha adoptado su mejor estrategia, y todos conocen las estrategias de los otros. Consecuentemente, cada jugador individual no gana nada modificando su estrategia mientras los otros mantengan las suyas. Así, cada jugador está ejecutando el mejor “movimiento” posible teniendo en cuenta los movimientos de los demás jugadores. En otras palabras, un equilibrio de Nash es una situación en la cual todos los jugadores han puesto en práctica, y saben que lo han hecho, una estrategia que maximiza sus ganancias dadas las estrategias de los otros. Consecuentemente, ningún jugador tiene ningún incentivo para modificar individualmente su estrategia.

Es importante tener presente que un equilibrio de Cournot-Nash no implica que se logre el mejor resultado conjunto para los participantes, sino sólo el mejor resultado para cada uno de ellos considerados individualmente. Es perfectamente posible que el resultado fuera mejor para todos si, de alguna manera, los jugadores coordinaran su acción.

<sup>53</sup> En teoría de juegos, un juego no cooperativo es uno cuyos jugadores toman decisiones independientemente para su beneficio personal, lo cual no impide que en algunos casos dicha toma de decisiones pueda favorecerlos a todos, como es lo que se busca en los juegos cooperativos. La teoría de juegos es un área de las matemáticas aplicadas que utiliza modelos para estudiar interacciones en estructuras formalizadas de incentivos (los llamados «juegos») y llevar a cabo procesos de decisión. Sus investigadores estudian las estrategias óptimas, así como el comportamiento previsto y observado de individuos en juegos. Tipos de interacción aparentemente distintos pueden, en realidad, presentar estructura de incentivo similar y, por lo tanto, se puede representar mil veces conjuntamente un mismo juego.

En términos económicos, es un tipo de equilibrio de competencia imperfecta que describe la situación de varias empresas compitiendo por el mercado de un mismo bien y que pueden elegir cuánto producir para intentar maximizar su ganancia.

#### - El equilibrio de Stackelberg

El equilibrio de Stackelberg en económica es un caso especial de competencia imperfecta. En teoría de juegos, es un caso especial del equilibrio de Nash. El equilibrio de Stackelberg implica específicamente que el juego es repetitivo. Este equilibrio se basa en la teoría de la competencia de Stackelberg, de acuerdo a la cual dos o más empresas compiten a fin de dominar el mercado. Una de esas empresas —denominada “líder”— ya tiene una posición dominante, consecuentemente sus estrategias determinan la de sus seguidores o competidores.

Otras condiciones de esta competencia son: a) el líder siempre juega primero; por tanto, los competidores siempre saben cuál es la primera jugada. b) El líder sabe que los seguidores observan su acción para determinar la suya. c) El líder sabe que los competidores no tienen la opción de cambiar las reglas del juego (es decir, no pueden transformar la competencia de Stackelberg en algún otro tipo).

La formulación matemática de los juegos de equilibrio de *Stackelberg* es conocida como *programas matemáticos con restricciones de equilibrio (MPEC)*.

Un programa matemático con restricciones de equilibrio (MPEC) es un modelo de optimización en el que cierto conjunto de restricciones está definido mediante una desigualdad variacional. En este problema se distinguen dos problemas anidados: el de optimización, que recibe el nombre de problema exterior o problema del nivel superior, y el problema de la desigualdad variacional, que se le denomina problema interior o problema del nivel inferior. El término de restricciones de equilibrio hace referencia a que la desigualdad variacional modeliza ciertos equilibrios que aparecen en problemas de economía e ingeniería.

Este modelo considera dos conjuntos de variables, que denotaremos “ $x \in R^n$ ” y “ $y \in R^m$ ”. Las variables ‘ $x$ ’ parametrizan una desigualdad variacional. Las variables ‘ $x$ ’ reciben el nombre de *variables del nivel superior* y las variables ‘ $y$ ’ el de *variables del nivel inferior*.

El MPEC puede ser formulado considerando dos funciones  $f: R^{n+m} \rightarrow R$  y  $F: R^{n+m} \rightarrow R$ , un conjunto cerrado y convexo  $Z \subset R^{n+m}$  y una aplicación punto-conjunto  $\Omega: R^{n+m} \rightarrow R$  cuyas imágenes son conjuntos cerrados y convexos, es decir, para cada valor ‘ $x$ ’,  $f(x)$ , es un subconjunto cerrado y convexo de  $R^m$ . La función  $f$  es la *función objetivo* del problema de optimización;  $F$  es la *función de costes (equilibrio) de la desigualdad variacional*,  $Z$  es la *región factible del problema de optimización* para el par  $(x, y)$  y el conjunto  $\Omega(x)$  define la *región factible* para el problema de la desigualdad variacional.

El problema MPEC se formula:

$$\text{Minimizar } f(x, y) \tag{5.14}$$

Sujeto a:

$$(x, y) \in Z \tag{5.14a}$$

$$y \in S(x) \tag{5.14b}$$

Donde  $S(x)$  es el conjunto de soluciones de la desigualdad variacional definida por el par  $(F(x, \cdot), \Omega(x))$ , es decir, el vector pertenece al conjunto  $S(x)$  si y sólo si ‘ $y$ ’ es un elemento de  $\Omega(x)$  que cumple la desigualdad

$$F(x, y)^T(v-y) \geq 0, \quad \forall v \in \Omega(x) \tag{5.15}$$

En este sentido, (Heard, D.W.; Ramana, 1998), proponen un enfoque para definir el número mínimo de arcos con peaje para alcanzar un sistema óptimo usando MPEC, (Zhang & Yang, 2004), formulan un modelo de programación matemática (cuya solución está basada en un algoritmo genético) para determinar las tarifas, al igual que la localización del cordón. (Zhang, H.Y.; Zhou, 2009) abordan el problema de la ubicación de la tarifa por congestión de una red “multi-class” con unas condiciones de equidad social y espacial. (Han, D.; Yang, 2008) también se dirigieron al concepto “multi-class” y equilibrio de tráfico “multicriterio” para evaluar la pérdida de eficiencia causada por los modelos (Fan, 2016).

OPTION1																	
Toll Locations								Toll Rates									
1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1
0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0
0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1
OPTION2																	
Combined Toll Locations and Rates																	
1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	
1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	
1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	
0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	
1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	
0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	

Tabla 21. Estructura cromosómica de un algoritmo genético. Fuente: (Fan, 2016).

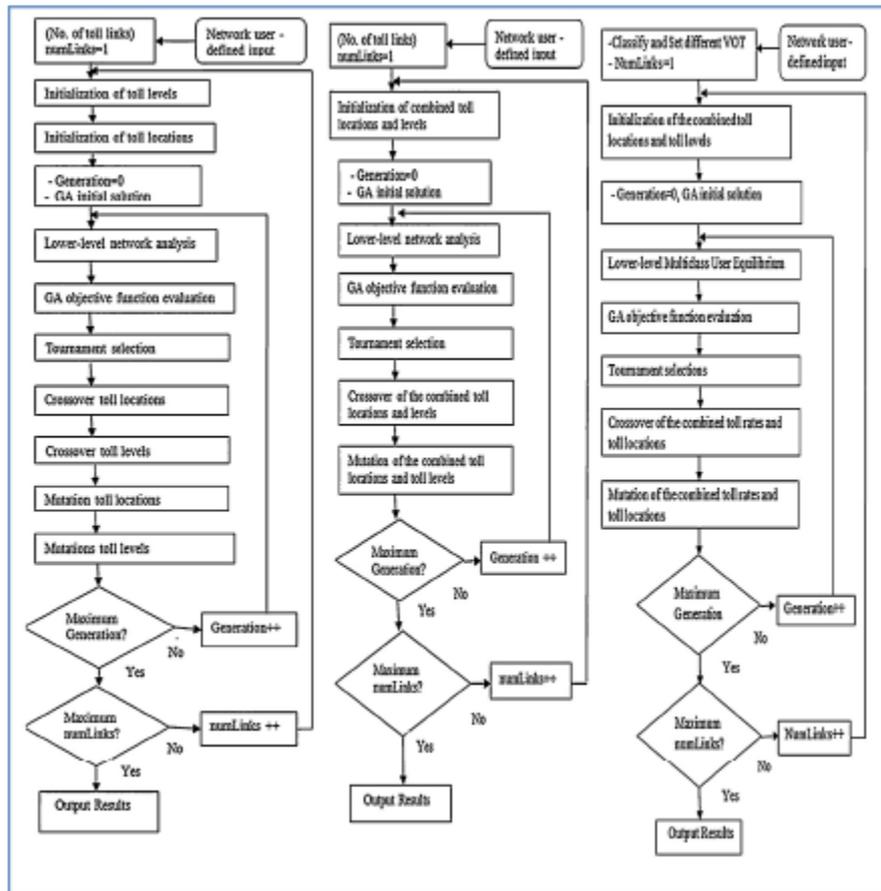


Figura 41. Diagrama de flujos de un algoritmo genético. Fuente: (Fan, 2016).

### 5.5.2 Generación de ingresos

Para una correcta predicción de ingresos en una infraestructura que será sometida a un peaje, es muy importante no escatimar ni en encuestas ni en estudios de tráfico, para así tener la mayor cantidad de información posible. A si mismo se tendrán en cuenta todos los posibles riesgos asociados como:

- Sobrecostos derivados de estudios y diseños.
- Sobrecostos de construcción.
- Sobrecostos de operación y mantenimiento.
- Riesgos comerciales en recaudo y evasión de peajes.
- Riesgos financieros por alteraciones en las condiciones de financiación.
- Riesgos regulatorios por cambios tributarios.
- Riesgos de fuerza mayor.

Es importante el uso adecuado de una tecnología de peaje que permita un pago sencillo y fiable que de seguridad en todo momento a sus usuarios.

A la hora de diseñar el esquema tarifario se debe tener en cuenta que es muy diferente un esquema diseñado que busque maximizar la eficiencia económica o que quiera maximizar los ingresos.

Los aspectos más investigados en virtud del uso de los ingresos, según (Ricci, et al. 2006), son los impactos en la equidad, los efectos de la descentralización de la tarificación y las decisiones sobre el uso de ingresos entre los distintos niveles del gobierno y otras instituciones (incluidos los administradores de infraestructuras privadas y las asociaciones público-privadas). Las investigaciones indican que el impacto en la equidad y en la eficiencia económica depende de la forma de utilizar los ingresos. Además, las decisiones que debe afrontar el gobierno en cuanto a la estructura tarifaria y el valor de la tarifa (niveles máximos y mínimos, descuentos, excepciones, etc.), influye también en la eficacia de la medida, puesto que los gobiernos tienden a ignorar los efectos secundarios fuera de la zona que les atañe.

## **5.6 Tarificación vial, equidad y eficiencia**

Uno de los grandes inconvenientes de implantar una tarifa de peaje que administre la congestión es su impacto potencial en la equidad. De acuerdo con (Riera, 1999) es un término difícil de manejar en economía, puesto que no existe una definición clara, operativa y única de aceptación general, lo que puede ser equitativo para unos puede no serlo para otros. Una determinada política de transporte será equitativa si es justa y comporta igualdad de oportunidades. Por ejemplo, que individuos con las mismas características relevantes, como el nivel de renta, reciban los mismos privilegios; o que grupos sociales o personas beneficiadas compensen a aquellos que son perjudicados.

(Ortega Hortelano, 2014) realiza un análisis completo del estado del arte y de las implicaciones prácticas de la tarificación sobre la equidad y la eficiencia que trataremos de resumir. El autor indica que el concepto de equidad es un concepto “relativo”, ya que, dependiendo de la definición considerada, la solución óptima podrá variar o no. A ello, hay que sumarle la dificultad para el planificador de transportes, de posibles cargas políticas y/o demagógicas. En este sentido, el concepto de equidad social se encuentra íntimamente relacionado con el concepto de justicia que aboga por tratar a cada uno del modo que le es debido. La valoración clásica de equidad suele hacerse desde una doble perspectiva: horizontal y vertical. La equidad horizontal establece que todas las personas con características similares deben ser tratadas de forma similar, ya que de lo contrario se estará incurriendo en una discriminación injusta. La equidad vertical por su parte establece que es justo favorecer más, o discriminar positivamente, a los más necesitados (Delbosc, A., and Currie, 2011). Ahora bien, éstas no son las únicas definiciones existentes de equidad. Por ejemplo, (Ungemah, 2007) destaca cinco formas distintas para definir la equidad como son la geográfica, de ingresos, de participación, de oportunidad y modal.

Cabe indicar que, aunque un proyecto no sea bueno desde el punto de vista de la equidad puede serlo en otros aspectos. El proyecto, entonces, podría finalmente ser equitativo siempre y cuando se dedicaran parte de los beneficios que generara a compensar la pérdida de equidad.

Diferentes autores tratan de evaluar la equidad en la tarificación vial. (Done, R.S. and Tong, 2009) indican que la equidad puede ser evaluada desde cuatro puntos de vista diferentes. El primero es la salud y seguridad humana, y un ejemplo de medición puede ser la calidad del aire por medio de modelos de contaminación atmosférica. La segunda perspectiva es la del desarrollo económico, precio del suelo y valor de las propiedades, en los que la accesibilidad del transporte juega un papel clave. Por ejemplo, se podrían evaluar el empleo y la productividad, las plusvalías por las propiedades, etc. La tercera perspectiva se da en los estratos sociales y culturales, como la cohesión de la comunidad, el arraigo de cierta cultura, etc. Esto se puede evaluar por medio de modelos de demanda de transporte, modelos de actividad a realizar y transporte que se usa, simulaciones de transporte y sistemas, etc. Y la cuarta y última forma de medirla es en el entorno natural. De esta forma, por medio de modelos acústicos se pueden evaluar algunos términos como el ruido y la ocupación visual.

Otros autores como (Leck, E., Bekhor, S., and Gat, 2008) evaluaron el impacto que las reducciones de los tiempos de viaje tenían en la equidad económica entre las regiones centrales y las periféricas. Estudiaron si las mejoras en el transporte podían generar beneficios económicos sociales, como por ejemplo la convergencia salarial entre los dos tipos de regiones mencionados. Así, propusieron una metodología que se dividía en varias etapas, que pueden verse en la figura siguiente:

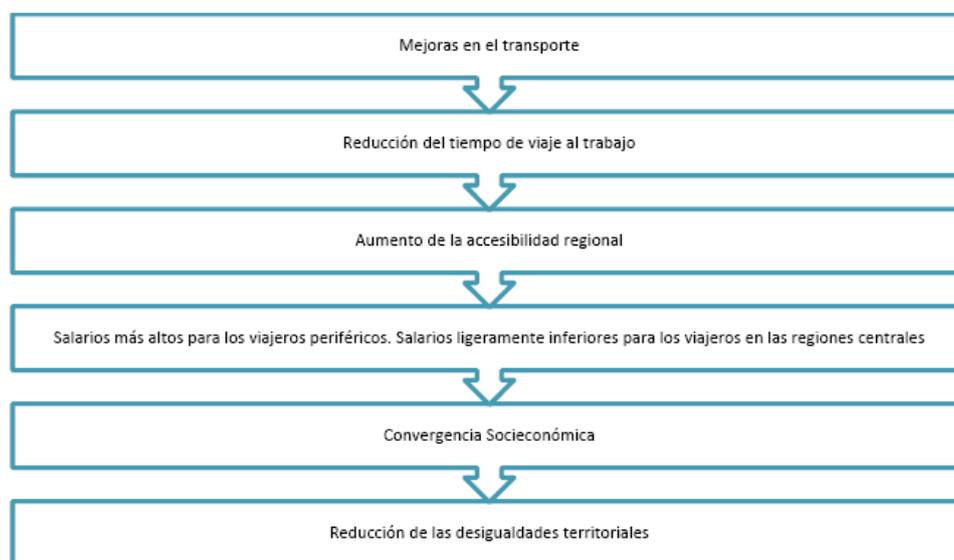


Figura 42. Metodología propuesta en Leck, Bekhor y Gat (2007). Fuente: (Ortega, 2014).

De la aplicación práctica de esta metodología para el caso de Israel obtuvieron que las reducciones del tiempo de viaje disminuían las desigualdades y, por tanto, aumentaban la equidad.

Existen indicadores, como el coeficiente de Gini, que proporcionan una medida de la desigualdad y que fue ideada por el estadístico italiano Corrado Gini. Normalmente se utiliza para medir la desigualdad en los ingresos, dentro de un país, pero puede utilizarse para medir cualquier forma de distribución desigual. El

coeficiente de Gini es un número entre 0 y 1, en donde 0 se corresponde con la perfecta igualdad (todos tienen los mismos ingresos) y donde el valor 1 se corresponde con la perfecta desigualdad (una persona tiene todos los ingresos y los demás ninguno). El índice de Gini es el coeficiente de Gini expresado en referencia a 100 como máximo, en vez de 1, y es igual al coeficiente de Gini multiplicado por 100. El índice de Gini, aportado por la fórmula de (Brown, 1994), se puede utilizar para relacionar la proporción de gastos en transporte con respecto a los ingresos y de esta manera calcula la equidad:

$$G = \left[ 1 - \sum_{i=1}^{i=n} (p_{i+1} - p_i)(I_i + I_{i+1}) \right] \quad (5.16)$$

Donde:

$P_i$  = Proporción acumulada de la población en el grupo  $i$ .

$I_i$  = Ingreso/coste de transporte acumulado en el grupo  $i$ .

$n$  = Número de grupos en los que se divide la población.

En esta línea, (Feng, T., Zhang, J., and Fujiwara, 2009) centran el estudio de medir la diferencia de equidad por medio de la accesibilidad y del tiempo de desplazamiento, sin hacer una distinción entre los motivos del viaje. La definición aportada de equidad es la que se refiere a la justicia en la distribución de los impactos, tanto en costes como en beneficios. Esto es, la localización adecuada de dichos impactos. En este caso, desarrollan distintos indicadores y se analizan las inversiones necesarias para alcanzar cierto grado de equidad, que en el campo del transporte consistiría en tener las mismas oportunidades de accesibilidad. Estos indicadores son adaptaciones de índices económicos de igualdad, como el índice de GINI, al campo del transporte y pueden observarse a continuación:

Índice de GINI, expresado como:

$$Z = \frac{1}{2N^2\bar{A}} \sum_{j \in N} \sum_{k \in N} |p_j A_j - p_k A_k| \quad (5.17)$$

Índice de THEIL, expresado como:

$$Z = \frac{1}{N} \sum_{k \in N} p_k \log \left( \frac{A_k}{\bar{A}} \right) \quad (5.18)$$

Logaritmo de la desviación media (LDEV), expresado como:

$$Z = \frac{1}{N} \sum_{k \in N} p_k |\log(\bar{A}) - \log(A_k)| \quad (5.19)$$

Desviación relativa media (RDEV), expresado como:

$$Z = \frac{1}{N\bar{A}} \sum_{k \in N} p_k | \bar{A} - A_k | \quad (5.20)$$

Coefficiente de variación (COV), expresado como:

$$Z = \frac{1}{\bar{A}} \left[ \frac{1}{N} \sum_{k \in N} p_k (A_k - \bar{A})^2 \right]^{1/2} \quad (5.21)$$

Índice de Atkinson, expresado como:

$$Z = 1 - \left[ \sum_{i=1}^N p_k \left( \frac{A_k}{\bar{A}} \right)^{1-\epsilon} \right]^{1/(1-\epsilon)} \quad \text{donde } \epsilon \neq 1 \quad (5.22)$$

$$Z = 1 - \exp \left[ \sum_{k \in N} p_k \log \left( \frac{A_k}{\bar{A}} \right) \right]^{(1-\epsilon)} \quad \text{donde } \epsilon = 1 \quad (5.23)$$

En las expresiones anteriores  $\bar{A}$  indica la accesibilidad media y  $\epsilon$  se usa para representar el peso atribuido por la sociedad a la equidad en la distribución. Los subíndices  $k$  y  $j$  hacen referencia a la zona, mientras  $N$  indica el número total de zonas y  $p_k$  es la proporción de población en la zona  $K$ . Con ello se construye un modelo de dos niveles, en el que el nivel superior se usa para optimizar la equidad de la accesibilidad en el escenario de mejoras de la capacidad, mientras que el nivel inferior se utiliza para el modelo de equilibrio. Las conclusiones son que, aunque los resultados en la equidad con los indicadores utilizados son los mismos, las inversiones necesarias para obtenerlos son en unos casos más elevadas que en otros, dependiendo del indicador. Por lo tanto, como puede observarse, la solución del problema varía dependiendo del indicador de equidad utilizado.

(Litman, 2005) considera evaluar directamente cada uno de los impactos y ponderarlos según los criterios elegidos en un rango de (+/-) 3. Un ejemplo de estos impactos y ponderaciones puede observarse en la tabla inferior:

<i>Impacto</i>	<i>Escenario 1</i>	<i>Escenario 2</i>	<i>Escenario 3</i>
Tratar a todos por igual	-2	-2	1
Internalización de costes por los usuarios	0	-2	3
Progresividad con respecto al ingreso	2	3	-3
Beneficia a los perjudicados por el transporte	0	3	1
Mejora básica de la movilidad	2	3	3
Reduce la congestión	3	2	3
Ahorros en parking y carretera	-3	2	3
Ahorro usuarios	0	3	-3
Seguridad en la carretera	1	2	2
Protección medioambiental	-2	3	3
Uso eficiente de los usos del suelo	-3	3	2
Habitabilidad para la comunidad	-3	3	3

Tabla 22. Evaluación de la equidad propuesta por Litman (2005). Fuente: Ortega, (2014).

(Davis, C., and Jha, 2009) propusieron otra forma de estudiar la equidad para lo que se centraron en localizar el trazado de una vía de nueva construcción que no cayera en desigualdades de equidad por medio del efecto barrera. Posteriormente penalizaron en mayor o menor medida el trazado de la vía dependiendo de los barrios por los que pasaba. La conclusión más importante fue que la localización óptima de la vía dependía mucho de las penalizaciones que se hicieran; dicho de otra forma, de los pesos que se les atribuían. Por lo tanto, el resultado obtenido era muy subjetivo.

A igual que (Davis, C., and Jha, 2009) muchas de las investigaciones analizadas sobre la equidad tratan de desagregar lo máximo posible los grupos poblacionales, para posteriormente ver las consecuencias sobre los distintos estratos sociales definidos. Sin embargo, como se demuestra en (Cherchi, E., and Polak, 2007) pueden existir situaciones en las que esta forma de analizar la equidad no sea la más adecuada. Los autores estudian los efectos de incorporar la ratio de ingresos/coste a la función de maximización de la utilidad y a los modelos de elección discreta. Concluyen que utilizar una función de costes lineal funciona bien a nivel general excepto para los estratos de población más pobres donde los errores aumentan. Por lo tanto, cuando se tiene que centrar la atención en los estratos de personas con bajos ingresos, recomiendan utilizar un modelo no lineal.

### 5.6.1 Impacto de la tarificación sobre la equidad

La relación entre peaje y equidad ha sido ampliamente estudiada por la literatura académica desde una doble perspectiva: desde un punto de vista teórico y/o desde un punto de vista práctico. Por ejemplo, (Richardson, 1974) incorpora a la literatura sobre los efectos distributivos del “road pricing” discusiones de carácter cualitativo. Para poder evaluar correctamente la equidad de un programa de “pricing” hay que considerar el nivel de ingresos y el modo de transporte de los usuarios. Así los efectos de la tarificación sobre las personas con vehículo son siempre regresivos, mientras que en el caso de los usuarios de la vía el resultado es ambiguo, ya que se podrá favorecer a los usuarios del transporte público. Una de las claves

para que aumente la equidad reside en el uso de los ingresos, que deben ser gastados de forma progresiva, en lugar de un descuento anual en los impuestos al vehículo.

(Izquierdo, R., and Vassallo, 2001) estudian desde un punto de vista teórico los aspectos relativos del peaje sobre la equidad. Los autores consideran el peaje como un mecanismo de financiación de una nueva infraestructura e identifican un total de tres tipos de equidades, que son:

- Equidad intergeneracional. Este tipo de equidad se da porque la infraestructura la pagan aquellos que se benefician de su uso. De otra forma, si las obras se realizan con cargo a los presupuestos no es justo que la paguen los contribuyentes por medio de los impuestos en el plazo de uno o dos años, y no sepan si van a poder disfrutar de sus beneficios.
- Equidad interregional. Se logra desde tres perspectivas diferentes. La primera es que, al liberar recursos de la Administración Pública, se pueden financiar otro tipo de obras en regiones menos desarrolladas para así fomentar su crecimiento económico y cohesión territorial. En segundo lugar, este mecanismo permite disponer con antelación de la carretera, lo que permitirá disfrutar de los beneficios con anterioridad y, por lo tanto, que las regiones más desfavorecidas obtengan ganancias ya sea directa o indirectamente. Por último, si el Estado está dispuesto a establecer subvenciones o algún tipo de garantía a las concesionarias, la viabilidad de las carreteras con poco tráfico aumentará, y el peaje dejará de ser un elemento perturbador de la equidad interregional.
- Equidad entre estratos sociales. En contra del argumento de que el transporte es un bien de primera necesidad y las personas con menos ingresos gastan más en transporte proporcionalmente que las de mayores ingresos, caben destacar otras exposiciones que demuestran que el peaje puede contribuir a la equidad entre estratos sociales. Hay que tener en cuenta que el peaje descongestiona las carreteras, y por ello consigue que el transporte público sea más eficaz, beneficiando de esta forma a estas capas sociales más desfavorecidas. Además, existen mecanismos como la progresividad de los impuestos directos, subvenciones a familias numerosas o con rentas más bajas que hacen que el peaje sea igualmente equitativo entre los distintos estratos sociales.

(Viegas, 2001) analiza igualmente desde un punto de vista teórico las opciones para conseguir que los sistemas de “pricing” sean aceptables y efectivos para acceder a las ciudades en lo referente a la equidad y la calidad. En este sentido, el mayor problema que suelen tener los programas de “pricing” es que los economistas defienden tarificar a coste marginal. Sin embargo, esto es algo muy difícil de explicar a la población y sería mejor tarificar por un sistema de transportes de mayor calidad. El autor propone una tarificación similar a la del nivel de servicio ofrecido en la vía, de forma que si existe congestión el precio debe ser mayor que si no la hay. Igualmente, dependiendo del modo de transporte el coste debe diferir. Del mismo modo propone que de forma gratuita un 80% de los días de trabajo se pueda entrar gratuitamente a la ciudad y por el otro 20% sea necesario el pago del peaje. Pero dentro de ese 80% de los días, hay que tener en cuenta que, si todos los desplazamientos del usuario son en coche, entonces solamente sea el 50%

de los días gratuitos. Pero si por el contrario el usuario utiliza el transporte público, entonces este acceso gratuito debe ser de más días. El sistema propuesto conseguiría la racionalización del uso del transporte y se eliminarían gran parte de los problemas de congestión que se producen en los accesos a muchas ciudades.

Una importante percepción cualitativa sobre el peaje es que, por norma general, en las áreas donde ya hay peaje la población no es tan reacia al pago por uso como en las áreas donde no lo hay (Álvarez, et al. 2007). Este mismo aspecto es igualmente demostrado por (Bain, 2009), al encontrar en las cuestiones culturales una de las características más importantes a la hora de implantar un peaje.

En (Franklin, 2007) se analiza los efectos distributivos sobre la equidad al mejorar un puente en EE. UU y hacer algún carril de peaje. Se identifican cuatro grupos sociales relacionados con el peaje: cautivos del coche, usuarios que se cambian al bus, usuarios que cambian al coche y, por último, los cautivos del bus. Para poder identificar los efectos de cada medida en la política de transportes sobre los usuarios, se hacen cuatro etapas diferentes. Estas etapas son, en primer lugar, la situación sin peaje, posteriormente, con peaje, pero con la congestión anterior, en tercer lugar, con cambios modales y reducción de congestión y, en cuarto y último lugar, la redistribución de los ingresos sobre la población. El modelo considera igualmente los impuestos que se pagan. La metodología llevada a cabo para desarrollar estas cuatro etapas se divide en las siguientes fases:

Fase 1: se trata de conocer la distribución modal. Para ello se aplica un modelo Logit binomial bus vs coche.

Fase 2: esta metodología mide los efectos de la congestión por medio de una serie de iteraciones. En el comienzo de estas iteraciones, se considera que no hay congestión y que el tiempo de viaje es el del flujo libre.

Fase 3: se mide el bienestar social por medio de las utilidades y se obliga a que sea igual antes y después de redistribuir o compensar por los efectos de la política aplicada.

Fase 4: se comprueban los efectos sobre la equidad con el Índice de GINI y la entropía de Theils. Estos índices tienen la siguiente formulación. Índice de GINI:

$$G(\mathbf{w}) = \frac{1}{2N^2\hat{w}} \left[ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |w_i - w_j| \right] \quad (5.24)$$

Donde:

$\hat{w} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i$ , medida del bienestar social entre la población estudiada.

Entropía de Theil para la distribución del bienestar social,  $T(w)$ :

$$T(w) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{w_i}{\hat{w}} \log \left( \frac{w_i}{\hat{w}} \right) \quad (5.25)$$

El autor demuestra que, si no se redistribuyen los ingresos del peaje, se convierten en simples impuestos. En este caso, es interesante observar que el comportamiento modal del transporte se analiza incorporando una función no lineal de ingresos.

(Bureau, B., and Glachant, 2008) estudian los efectos que tendría sobre la equidad una política de “pricing” en París. Simulan nueve escenarios distintos e introducen una función de elección modal no lineal con respecto al ingreso. Obtienen que los conductores sufren pérdidas de bienestar al introducir los peajes. Además, los efectos distributivos del peaje dependen en gran medida de las reducciones de tráfico que se obtengan. Por último, destaca que los peajes más estrictos favorecen más a las capas con menores ingresos de la población, ya que en última instancia podrán ganar más tiempo al trasvasarse al transporte público.

(Schweitzer, L., and Taylor, 2008)) se plantean la pregunta de si resulta más equitativo el pago del transporte por medio de impuestos o de peajes. En este sentido, critican aquellos estudios que rechazan el uso de los programas de “pricing” por ser poco equitativos, ya que por medio de los impuestos deben pagar infraestructuras que quizás no usen. En el caso de estudio de la “State Route 91” comparándola con la opción de pago por medio de impuestos, encuentran que con la opción de la financiación vía impuestos los contribuyentes que usan menos el transporte, acaban por transferir riqueza a los estratos sociales con mayor poder adquisitivo. Por lo tanto, se trata de una medida regresiva. Por el contrario, por medio del peaje, los grupos sociales más desfavorecidos pagan menos en el transporte que por medio de los impuestos; mientras que los individuos con mayor poder adquisitivo deben pagar más. Por todo ello, es más progresivo el uso del peaje que de los impuestos.

(Ferrari, 2005) estudia el bienestar de dos tipos de usuarios al imponer un peaje en un entorno urbano. Se trata de usuarios de transporte público y usuarios de transporte privado. Además, hay un tercer tipo de usuarios: aquellos que pueden trasvasarse del transporte privado al público. Particularmente estudia el excedente de los usuarios antes y después de tarifcar. Simula un área urbana por medio de un modelo mallado y concluye varios aspectos relevantes. El incremento del excedente depende de la reducción del coste del transporte público derivada de una menor congestión. En grandes áreas urbanas con muchos usuarios cautivos del transporte público estos excedentes pueden ser importantes. Por todo ello, el número de usuarios cautivos del transporte público y el coste de los usuarios de este transporte por la congestión son dos de los aspectos que determinan la eficiencia de esta política. Además, cuando no existe congestión y no hay muchos usuarios cautivos del transporte público, tarifcar puede suponer una pérdida de bienestar social. Sin embargo, si existiesen muchos usuarios cautivos, entonces la tarifcación podría suponer una transferencia de excedente de un tipo de usuarios a otros.

(Zhicai et al., 2008) indagan en los efectos sobre la equidad de programas de “pricing” en entornos urbanos. La metodología se centra en el cálculo de los tiempos de viajes de los distintos modos de transporte antes

y después del “pricing”, y compararlos por medio de curvas de Lorenz<sup>54</sup>. En el caso de las ciudades chinas se demuestra que la equidad se mejora tras introducir un peaje.

Por último podemos encontrar una revisión de la experiencia noruega de los programas de tarificación urbanos en (Lauridsen, 2011). En este caso, las cuestiones analizadas son la eficiencia económica, el desarrollo regional, la redistribución de los ingresos entre las regiones y el proceso de decisión del programa de “pricing”. Debido a la tarificación hay más dinero para la construcción de infraestructuras y, además, se encuentra una mayor inversión en zonas centrales y urbanas.

### **5.6.2 Integración de eficiencia económica y equidad en la tarificación**

En este apartado se exponen las implicaciones de la tarificación vial desde el punto de vista de su integración con la eficiencia económica y la equidad a partir del estudio realizado por (Ortega, 2014). Entre otros autores, (Litman, 2011) analiza desde un punto de vista teórico como la utilización de los ingresos obtenidos por los programas de “road pricing” pueden afectar en la eficiencia económica y la equidad. Analiza las cuatro cuestiones más importantes del “road pricing”, que son la eficiencia económica, la equidad, los costes externos y la factibilidad política de llevarlo a cabo. El conjunto del estudio es muy cualitativo, llegando a la conclusión de que la más fácil de las cuestiones a aplicar es la eficiencia económica, porque no importa cómo se reparten los beneficios. Respecto a la eficiencia económica y los costes externos, se tratan de forma conjunta, y se indica que la eficiencia económica se alcanza cuando el sistema sirve para maximizar el bienestar social. En cuanto a la equidad, la separa en las dos definiciones clásicas de equidad vertical y horizontal. Es necesario resaltar el análisis realizado en la Tabla 23 con las consideraciones sobre los distintos actores y su afección en cuanto a la equidad.

---

<sup>54</sup> La curva de Lorenz es una representación gráfica utilizada frecuentemente para plasmar la distribución relativa de una variable en un dominio determinado. El dominio puede ser el conjunto de hogares o personas de una región o país, por ejemplo. La variable cuya distribución se estudia puede ser el ingreso de los hogares o las personas. Utilizando como ejemplo estas variables, la curva se trazaría considerando en el eje horizontal el porcentaje acumulado de personas u hogares del dominio en cuestión y en el eje vertical el porcentaje acumulado del ingreso. Su autoría es de Max. O. Lorenz en 1905.

Clase	Descripción	Equidad Horizontal	Equidad Vertical
<i>No conductores</i>	Personas que no pueden conducir debido a la edad, incapacidad o bajos ingresos. Suelen usar el coche como pasajeros, pero su uso de carreteras congestionadas es muy bajo.	Aunque este grupo pagaría muy poco en peajes, merecen compartir los ingresos si se consideran compensaciones por las externalidades de los conductores.	Ya que en este grupo se incluyen personas que son económica, física y socialmente perjudicadas, la mayor parte de los ingresos del sistema deben servir para beneficiar a este grupo, lo que está plenamente justificado.
<i>Conductores de bajos ingresos</i>	Personas que pueden conducir y tienen acceso al coche, pero que sus decisiones están muy influenciadas por los costes en los que incurrirán. Elegirán habitualmente opciones diferentes al peaje.	Este grupo paga relativamente poco porcentaje del peaje, pero incurren en costes derivados de cambios en sus viajes y ofrecen al sistema gran parte de los beneficios por la reducción de la congestión. Merecen como compensación compartir parte de los ingresos.	Este grupo está, por definición, desfavorecido así que el uso del <i>road pricing</i> para beneficiarlos está justificado.
<i>Conductores con ingresos medios</i>	Personas que conducen y tienen coche. Sus decisiones se ven influenciadas de forma moderada por los costes que acarrearán. Algunas veces no elegirán la autopista por el <i>pricing</i> y su beneficio total se verá reducido.	Estos conductores pagan una gran parte de los ingresos totales y tienen pérdidas netas en su bienestar. Merecen que el sistema les compense con la base de la equidad horizontal, pero solamente después de que todos los costes externos se hayan compensado.	Ya que este grupo no se encuentra desfavorecido, no hay razón dentro de la equidad vertical para que el uso de los ingresos les beneficie.
<i>Conductores con ingresos altos</i>	Personas que conducen y tienen coche. Sus decisiones no se ven afectadas por los costes en los que incurrirán. Se beneficiarán del <i>pricing</i> por la reducción general de la congestión.	Estos conductores disfrutan de beneficios netos por la reducción de la congestión. Merecen compartir parte de los ingresos pero solamente después de que se hayan compensado la totalidad de los costes externos.	Ya que este grupo no se encuentra desfavorecido, no hay razón dentro de la equidad vertical para que el uso de los ingresos les beneficie.

Tabla 23. Incidencia sobre la equidad del road pricing. Fuente: Ortega, (2014).

Por último, respecto a la aceptabilidad política, Litman destaca la complejidad de implantar este tipo de sistema, ya que debido al gran número de ganadores y perdedores de los sistemas de “pricing”, políticamente resulta muy difícil implantar estos sistemas de gestión de la demanda. En la Tabla 24 se pueden observar los ganadores y perdedores considerados por el autor:

<i>Ganadores Directos</i>	<i>Perdedores Directos</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conductores con mayor poder adquisitivo, que valoran más su tiempo de viaje que el pago del peaje.</li> <li>• Autobuses y viajeros que comparten vehículo que disfrutan de la mejora por la reducción de la congestión y las economías de escala.</li> <li>• Beneficiarios de los ingresos del peaje.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conductores con menor poder adquisitivo que pagan el peaje porque no existe alternativa, pero no valoran las ganancias del tiempo tanto como el peaje.</li> <li>• Conductores que cambian a otras vías para evitar pagar el peaje.</li> <li>• Usuarios de carreteras libres de pago que experimentan un incremento de la congestión.</li> <li>• Conductores que renuncian a realizar los viajes por el peaje.</li> <li>• Conductores que cambian de modo de transporte y comparten coche por el peaje (aunque las mejoras del servicio debido a las economías de escala hace que algunos de estos sean ganadores netos del sistema)</li> </ul>

**Tabla 24. Ganadores y perdedores del road pricing. Fuente: Ortega, (2014).**

Sin embargo, desde un punto de vista práctico, la realización de un proyecto de transporte puede tener muchas y muy diversas consecuencias, siendo prácticamente imposible conseguir un proyecto óptimo que no tenga ganadores ni perdedores. Por ello, obtener un peaje que satisfaga todas las necesidades económicas a las que hay que hacer frente en una vía es prácticamente imposible, ya que deben darse varias condiciones de forma simultánea que son muy difíciles que coincidan. Ahora bien, si al problema de la eficiencia económica se le añade el problema de la equidad social, la solución se complica enormemente. Así, la perspectiva de la eficiencia no es la única que debe considerarse al implantar un peaje, ya que pueden surgir varios problemas ya estudiados, como por ejemplo la gran variación instantánea de precios según la congestión y las externalidades, favorecer únicamente a las clases más pudientes, etc. Todo esto cobra especial relevancia en el entorno urbano, donde para alcanzar el óptimo eficiente sería necesario tarificar con los mismos criterios a otros modos de transporte como el ferrocarril o el transporte público, con lo que se crearía un sistema de transportes totalmente incomprensible para el usuario (Ortega Hortelano, 2014). Por todo ello, (De Corla-Souza, 2009) hace hincapié en que una de las claves del éxito de los programas de “pricing” es precisamente una información clara, simple y concisa.

De forma práctica, la tarificación en el entorno urbano debe considerarse como parte de una planificación más completa y en la que una de las claves debe ser la mejora de la movilidad urbana por medio de una movilidad más sostenible. Es en estos entornos urbanos donde (Basso et al., 2012) estudian la eficiencia de distintas políticas de transporte urbano considerando un modelo próximo a la realidad, en el que los autobuses y los coches comparten la carretera, el usuario puede elegir la bicicleta como medio de transporte y además el número de paradas, frecuencias de autobuses, tamaño y ocupación de los mismos no es fijo. Los autores demuestran que, en caso de implantar una única medida de forma aislada, los carriles bus son más eficientes que técnicas de “congestion pricing” o subsidios al transporte público. Además, estas subvenciones al transporte público hacen que en muchos casos el precio del billete sea negativo, lo que implicaría pagar a los usuarios de estos modos de transporte y por lo tanto el sistema de transportes sería ilógico. Por último, cuando se estudian de forma conjunta las subvenciones al transporte público y el

“congestion pricing”, se obtiene que los ingresos procedentes de estas tasas por congestión en todos los casos son suficientes para cubrir la subvención necesaria.

(Higgins, 2009) destaca para el caso de los “managed lanes” que la sensación de justicia por parte de los usuarios con menores niveles de ingresos (en teoría, los más desfavorecidos) es fundamental para que la sociedad en su conjunto acepte este tipo de actuaciones.

(Basso, L.J., and Jara Díaz, 2012) demuestran que para que la aceptabilidad social al implantar un peaje en una zona urbana no sea un problema, el excedente del usuario debe ser mayor que antes de la implantación del peaje. Esto es, que el usuario obtenga mayores beneficios que sin el peaje. Además, se pueden compatibilizar técnicas de “pricing” con subvenciones al transporte público sin que la aceptabilidad social disminuya.

Otro análisis sobre el excedente de los usuarios antes y después del peaje puede verse en (Van den Berg, V., and Verhoeff, 2011). Los autores demuestran que, si al imponer un peaje se consideran distintas penalizaciones del tiempo de viaje por congestión para distintos tipos de usuarios, entonces hay situaciones en las que los usuarios con menor valoración del tiempo de viaje y menor valoración en dicha penalización son los más favorecidos por la tarificación.

(Sanchez, T., Makarewicz, C., Haas P., 2007) analizan por medio de encuestas datos de costes del transporte en los EE. UU con respecto a los niveles de ingreso y gasto, y los combinan con las localizaciones de la vivienda. Se estudia conjuntamente el coste en transporte y vivienda por ser más interesante debido al efecto de dispersión urbana. Uno de los resultados es que las personas con mayor poder adquisitivo gastan menos proporcionalmente que las de menor poder adquisitivo por cada dólar gastado. El gasto medio de cada dólar gastado de una familia americana en transporte es de 18,6 céntimos, solo superado por la vivienda que son 19,2 céntimos. Además, los autores destacan que los costes en transporte son en general muy inelásticos. Como conclusión, el coste del transporte depende mucho del modo que se use, de los ingresos, del tamaño de la vivienda o las preferencias, y también de la localización de la vivienda.

(Palma, A. D., Lindsey, R., and Proost, 2006) analizan los resultados de distintas investigaciones acerca de la implantación de programas de “pricing” en cuatro ciudades europeas (París, Bruselas, Oslo y Helsinki). Concluyen que hay una considerable diferencia entre un programa teóricamente ideal y la puesta en práctica de estos programas, donde hay grandes redes de transporte, multitud de datos empíricos y las restricciones particulares de cada caso de estudio. Para aumentar la aceptabilidad de estos programas, únicamente se deben imponer peajes en ciertos enlaces o tramos y no en toda la red, y además solamente las nuevas infraestructuras deben estar tarificadas.

Como planificación ideal se debería obtener un peaje que sea óptimo desde el punto de vista económico, que cubra los costes de construcción, mantenimiento y operación, que cubra los costes externos y que, además, no incurra en desigualdades sociales. Por lo tanto, será necesario recurrir a soluciones de

compromiso en las que no se logren plenamente la totalidad de los objetivos posibles. Es precisamente en este contexto en el que la subvención cruzada cobra una especial relevancia, ya que puede hacer que el sistema funcione mejor y sea aceptado por la población. Sin embargo, aunque se trata de una solución a la que se recurre con frecuencia, no es la única posible y algunas de ellas ya se han visto con anterioridad. Por ello, es necesario buscar soluciones de compromiso que consigan alcanzar parte de los objetivos planteados. Los tres casos que posteriormente se describen de subvención cruzada corresponden con uno de un entorno urbano, otro de un entorno interurbano y, por último, uno planteado en entorno interurbano, pero aún no ejecutado.

El primero de los casos suele darse en algunas ciudades en las que la tarificación forma parte de un paquete más amplio de medidas de mejora del sistema de transportes, como por ejemplo en Londres. Estas medidas suelen incluir el fomento del transporte público por medio de bajadas de precios y aumento de frecuencias, la construcción de carriles bici o el alquiler de bicicletas. Precisamente, el dinero recaudado de la tarificación a los vehículos se invierte en este tipo de medidas, haciendo que se trate de un claro ejemplo de subvención cruzada. Sin embargo, tal y como se ha indicado con anterioridad, esto no tiene por qué suceder así, ya que el dinero recaudado puede destinarse a otras funciones (Litman, 2006).

El segundo de los ejemplos seleccionados se corresponde con las vías interurbanas chilenas. El modelo se basa en las subvenciones cruzadas entre las distintas autopistas. De esta forma, las vías con mayor tráfico colaboran en la financiación de las vías con una menor demanda. Para ello, las concesionarias de las autopistas más rentables se comprometen en la licitación a pagar al Estado una cantidad anual, mientras que las autopistas deficitarias reciben una cantidad proveniente de las arcas públicas. Gracias a estas subvenciones las tarifas tienen un nivel similar en cualquier vía de la red, con lo que se evitan desigualdades entre regiones (Vassallo, J.M., and Izquierdo, 2010).

Por último, es de destacar el caso de España. Este país cuenta con una gran tradición en el desarrollo de concesiones de autopistas de peaje, siendo un país pionero. Sin embargo, esto no ha impedido que este modelo de concesiones presente algunos defectos que pueden ser solventados (Saldaña et al., 2012). Uno de los problemas más importantes es la falta de equidad territorial en el pago por uso. De esta forma, mientras hay regiones con autovías gratuitas en las que el usuario no debe abonar ningún tipo de peaje, en otras regiones para circular por vías de gran capacidad es necesario pagar un peaje. Además, aunque las autovías de los últimos años presentan estándares de calidad similares a los de las autopistas, no sucede así con las autovías ejecutadas en los años 80 y principios de los 90, ya que tienen una calidad sensiblemente inferior. Por todo ello, se ha planteado un nuevo modelo concesional en el que las subvenciones cruzadas juegan un papel clave, el modelo OASIS<sup>55</sup>.

---

<sup>55</sup> OASIS (Operación de Autopistas Seguras Inteligentes y Sostenibles) enmarcado dentro del programa CENIT y promovido por un importante consorcio de empresas líderes del sector, el proyecto OASIS aborda la definición de la autopista del futuro desde un punto de vista global, abarcando todo su ciclo de vida completo y con el objetivo de que ésta presente niveles claramente diferenciales de servicio, seguridad y sostenibilidad. El proyecto abarca diferentes campos de investigación entre los que destacan los nuevos modelos concesionales, mejora de procesos constructivos,

En este modelo la red principal de carreteras será gestionada a través de concesiones de peaje ganadas de forma competitiva por distintas compañías privadas. Estas concesiones recibirán un cobro mensual o anual que dependerá de indicadores de calidad como el estado del pavimento, seguridad, calidad ofrecida y demás. Este pago lo realizaría la Administración pública, que sería la que fijase la tarifa para todas las vías en función del tipo de carretera, tipo de vehículo, hora del día, etc. La recaudación de estas tarifas podría hacerse a través de la propia concesionaria. En cualquier caso, la cantidad recaudada se destinaría al Ministerio de Fomento, que lo invertiría en pagar a las concesionarias, cubrir el coste del sistema electrónico de cobro y en mejorar el sistema de transportes.

Con este modelo se solventan dos de los problemas principales. Uno de ellos la falta de equidad territorial y de calidad de las vías. En este sentido, regiones más ricas podrán financiar las obras necesarias en regiones con menor poder adquisitivo. El otro problema resuelto, es que se consigue separar el pago del concesionario del cobro al usuario, de forma que el objetivo del modelo es obtener soluciones más cercanas a la tarificación en las que el coste marginal sea el punto de partida del precio calculado, con las pertinentes ganancias en el bienestar social.

---

nuevos sistemas inteligentes de transporte (ITS) en el ámbito de la seguridad y la movilidad, la interacción con el medio ambiente y la optimización energética. El proyecto se ha llevado a cabo gracias a la constitución de un consorcio formado por las principales empresas del sector y un conjunto de los más destacados centros de investigación distribuidos por todo el territorio nacional.

## **6. LA POSTURA DE LA UNIÓN EUROPEA SOBRE LA TARIFICACIÓN POR EL USO DE LAS INFRAESTRUCTURAS DE TRANSPORTE**

### **6.1 Introducción**

Como ya hemos visto, la tarificación vial persigue la finalidad de garantizar una correcta gestión del tráfico sobre el uso de infraestructuras viarias en términos de eficiencia, reducción de la congestión, consumo energético y siniestralidad, aportando además, ingresos adicionales que permiten ayudar a las administraciones a financiar proyectos de infraestructuras de transporte, socioeconómicamente rentables, que no pueden ser sostenidas mediante fondos públicos, sobre todo en tiempo de crisis. En este sentido la Unión Europea, ya desde 1971, tuvo como una de sus principales preocupaciones buscar un marco común para una política de tarificación en el transporte, que sirviese de instrumento para poder internalizar las externalidades que cada modo de transporte, debido a su actividad, generaba en sus desplazamientos. A pesar de ello no fue hasta 1982, con motivo de la aprobación del “Curso futuro de la política común de transporte”, cuando la Comisión Europea estableció los primeros pronunciamientos sobre la necesidad de contar con un sistema de tarificación global, en el marco de la Unión Europea, basado en el principio de “el que usa paga” y “el que contamina paga” (Carrasco et al., 2012).

Los nuevos principios, que sostenía la Unión Europea, se basaban en que el usuario debía asumir los costes y las externalidades del transporte, a través de tarifas o peajes, en aras a conseguir una mayor competitividad y eficiencia económica en el sector. Estos principios fundamentales se lograron materializar con la aprobación de la Directiva 1999/62/CE, o también llamada Euroviñeta, relativa a la aplicación de gravámenes a los vehículos pesados de transporte de mercancías por la utilización de determinadas infraestructuras. El objetivo de esta directiva era recuperar los gastos de construcción, mantenimiento y reparación en las carreteras, así como internalizar los costes del perjuicio medioambiental generado por el sector transporte, para así garantizar una competencia justa y no discriminatoria.

La Directiva Euroviñeta fue modificada por la Directiva 2006/38/CE con el objetivo de seguir avanzado en la incorporación de la tarificación vial como medida para internalizar los costes externos derivados del uso de infraestructuras, pero además, abrió la puerta a que los Estados miembros pudieran aplicar, de forma no discriminatoria, tasas reguladas destinadas a combatir los impactos sobre el medio ambiente, incluyendo la mala calidad del aire, en particular en las zonas urbanas. Quizás este hecho, pudo provocar que durante los últimos años en el ámbito de la Unión Europea se produjeran un abultado número de trabajos y proyectos, desarrollados y financiados por parte de la Unión Europea, con el ánimo de impulsar la implantación de sistemas de peaje urbano, como instrumento eficaz para solucionar en gran medida el problema medioambiental en entornos urbanos. Estos proyectos, además, vinieron fundamentalmente motivados por los resultados positivos logrados en los peajes urbanos nórdicos y del reino unido.

## 6.2 La regulación de la tarificación vial de infraestructuras en la Unión Europea

Previamente a la aprobación de la Directiva Euroviñeta en 1999, la Comisión Europea presentó en Bruselas el 20 de diciembre de 1995 la comunicación “CE COM (1995) 691 final” conocida como “Libro Verde: Hacia una tarificación equitativa y eficaz del transporte. Opciones para la internalización de los costes externos del transporte en la Unión Europea”. Podemos decir que este documento fue uno de los primeros documentos comunitarios donde se manifestaba una clara preocupación por el problema de la internalización de los costes externos asociados al sistema de transporte en el ámbito de Unión Europea.

El Libro Verde de 1995 describía las externalidades que se producían en el sector transporte indicando como se podían reducir y medir, además de presentar una serie de instrumentos de tarificación útiles para imputar, al usuario, las externalidades negativas asociadas al transporte como eran la congestión, la contaminación o la siniestralidad, mediante la aplicación de un sistema de precios basados en la equidad y eficiencia. En este documento ya se empezó a poner de manifiesto que la tarificación vial era una forma eficaz, a largo plazo, para hacer frente a la congestión y para internalizar los costes medioambientales del transporte proponiendo tarifas basadas en las emisiones efectivas.

*“La percepción de tasas a la emisión de contaminantes constituye, en principio, el instrumento más interesante para internalizar los costes en el sector del transporte. No es posible por el momento medir directamente las emisiones y gravarlas en función del coste medioambiental regional, puesto que la aplicación de tal medida es extremadamente costosa. Pero no es una razón para eximirse de actuar, en la medida en que existen otros instrumentos que permiten realizar un nivel suficiente de diferenciación y pueden aplicarse rápidamente. (Libro Verde. pág. 37)”*

Hemos visto como el Libro Verde fue el punto de partida de la tarificación vial e introdujo importantes novedades en este sentido, pero no fue hasta el año 1998 cuando la Comisión Europea publicó la Comunicación COM (1998) 466 final: “Libro Blanco. Tarifas justas por el uso de infraestructuras: Estrategia gradual para un marco común de tarificación de infraestructuras de transporte en la Unión Europea”. En este Libro Blanco se vuelve a contemplar la tarificación vial como medida para mantener la sostenibilidad del sistema de transporte en Europa.

*“La gravedad creciente de la saturación y de la contaminación ponen en tela de juicio la sostenibilidad del sistema de transporte. La tarificación de las infraestructuras de transporte puede contribuir a resolver esta clase de problemas, puesto que permite ejercer influencia en los precios, los cuales a su vez modifican los patrones de utilización del transporte. (Libro Blanco de la Comisión, de 22 de julio de 1998)”*

La publicación de 1998 indicaba las diferencias notables que existían, entre los Estados Miembros, en materia de tarificación del transporte y, evidenciaba, como los actuales regímenes tarifarios no guardaban relación con el coste percibido en el sector transporte, además de que no consideraban los aspectos

medioambientales y sociales. Esta realidad producía distorsiones de la competencia y dificultaba la financiación de las inversiones infraestructurales. Debido a esta situación, el Libro Blanco de 1998 propone una estrategia comunitaria común, en materia de tarificación, que se basaba en cuatro conceptos básicos:

- Aplicación de una tarificación con los mismos principios fundamentales al conjunto de los modos comerciales de transporte de todos los Estados miembros de la Unión Europea
- Las tarifas percibidas por el uso de infraestructuras deben basarse en el principio "el usuario paga".
- Las tarifas deben guardar relación directa con los costes producidos por los usuarios a las infraestructuras y a los demás ciudadanos.
- Las tarifas deben promover la oferta eficaz de infraestructuras.

Mediante este documento, la Unión Europea entendía que la única forma de responder a estos criterios era aplicando una tarificación basada en los costes sociales marginales, que consistía en cobrar a los usuarios los costes, tanto internos como externos (costes de explotación, costes relacionados con la degradación de las infraestructuras, la saturación, el daño al medio ambiente y los accidentes), que se producían por el uso de las infraestructuras. De esta forma las empresas de transporte se verían obligadas a utilizar vehículos poco contaminantes y seguros, optar por itinerarios que redujeran tanto la congestión como el daño medioambiental, así como la accidentalidad, e incluso valorar otras formas de transporte más eficientes. Con la introducción de semejante política de tarificación la Comisión Europea pretendía producir ventajas sociales del orden de 30.000 a 80.000 millones de euros al año.

El 20 de junio de 1999 entra en vigor la Directiva 1999/62/CE, llamada Euroviñeta, que armoniza las condiciones en virtud de las cuales las autoridades nacionales establecen impuestos, peajes y tasas al transporte de mercancías por carreteras. Los puntos claves de esta Directiva incluían que los cargos, que podían variar dependiendo de las emisiones o del tiempo de uso de la infraestructura, sólo se podían aplicar a los vehículos con un peso total máximo de 12 Tn por el uso de autopistas, puentes, túneles, puertos de montaña y otro tipo de carreteras.

Tras la Comunicación de 1998, la Unión Europea culminó en el año 2001 la publicación de un nuevo Libro Blanco titulado "La política europea de transportes de cara al 2010. La hora de la verdad", donde proponía una serie de medidas que giraban en torno a cuatro pilares básicos: el reequilibrio de los modos de transporte, la supresión de los puntos de estrangulamiento de los grandes ejes, la aplicación de una política de transporte al servicio de los usuarios y el encaje de la política de transportes europea a nivel internacional.

La nueva comunicación de 2001 seguía ahondando en la necesidad de aplicar la tarificación vial en el transporte por carretera.

*“Los usuarios del transporte tienen derecho a saber lo que pagan y por qué lo pagan. Contener la congestión en Europa, luchar contra el efecto invernadero, desarrollar las infraestructuras, mejorar la seguridad en la carretera o en el transporte público, reducir los efectos nocivos para el medio ambiente: todo esto tiene un coste. A este coste social deben añadirse los gastos de inversión para controlar mejor el transporte, poner en circulación nuevos trenes o construir nuevas infraestructuras. En adelante, la contrapartida de estos beneficios para la sociedad y los usuarios del transporte debería reflejarse, en mayor o menor medida, en los precios del transporte que abona el usuario, sin que ello deba afectar a la oferta de un servicio continuo de calidad en todo el territorio (Libro Blanco. pág. 78)”*

En este sentido indicaba que *“cualquiera que sea la solución actual para la tarificación de las autopistas, la carga media que soporta un camión que recorre 100 kilómetros oscila entre 12 y 24 euros, de los que apenas más de 8 euros representan cánones de infraestructura. Si las cargas aumentan, por medio de un canon de infraestructura o de un impuesto sobre los combustibles, el tráfico disminuirá, lo que reducirá rápidamente los costes externos y de infraestructura, hasta obtener el equilibrio entre los costes y las cargas. La búsqueda de este equilibrio debe ser la clave de una tarificación eficaz y equitativa (Libro Blanco. pág. 80)”*

A pesar de todas estas normativas, que han tratado de homogenizar la tarificación vial en la Unión Europea, Europa presenta un sistema de peajes de autopistas heterogéneos donde cada Estado Miembro ha aplicado un sistema tarifario diferente, asimismo el uso del sistema euroviñetas<sup>56</sup> ha tenido matices diferenciadores según los distintos países comunitarios. Este hecho se pone de evidencia en las figuras 43 y 44 donde podemos apreciar las diferentes estrategias tarifarias seguidas por cada país.

---

<sup>56</sup> Según Palmer y Riera, la “euroviñeta” (Directiva 199/62/CE), supone la obligación de un pago fijo anual a vehículos pesados que circulan por autopistas de siete estados de la Unión Europea (Alemania, Austria, Suecia, Dinamarca y países del Benelux) y cuyo gravamen se calcula en función del número de ejes como base para calcular el grado de deterioro de las infraestructuras y los efectos negativos sobre el medioambiente.

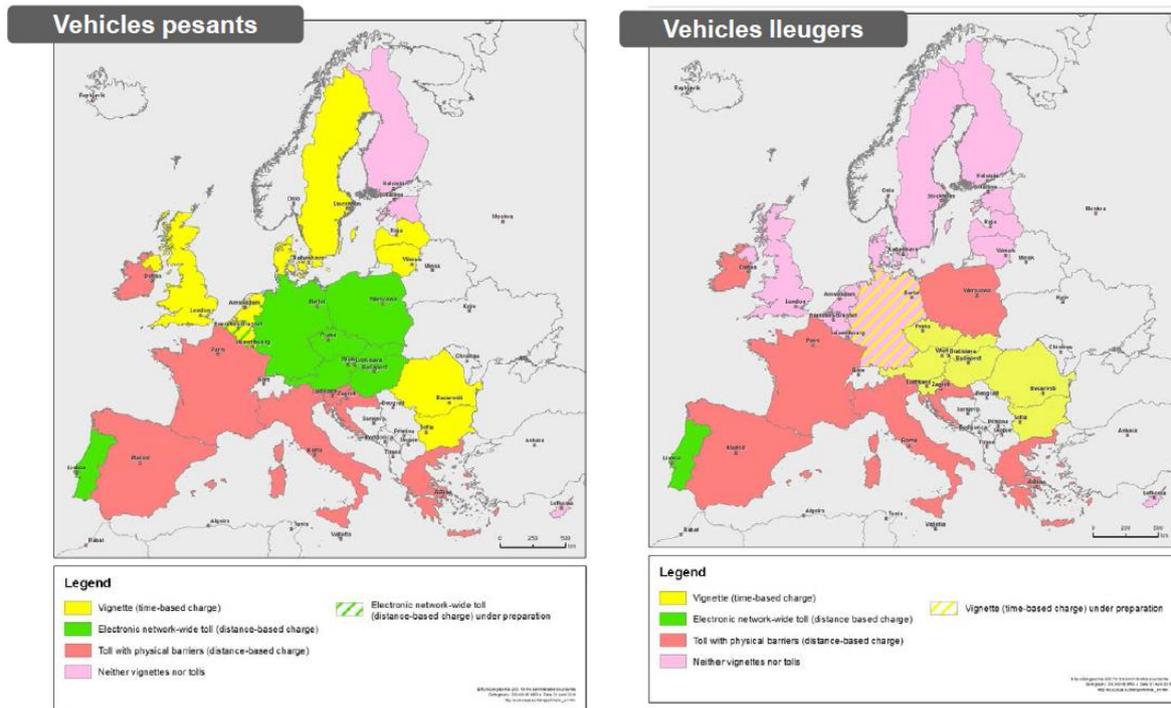


Figura 43. Estrategia de tarificación de vehículos pesados y ligeros en la Unión Europea. Fuente: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat, 2016.

### 6.2.1 Hacia la consolidación definitiva de la Euroviñeta

En 2006, precedida por la propuesta de Directiva COM (2003) 448, se aprobó la Directiva 2006/38/CE sobre la aplicación de gravámenes a los vehículos pesados de transporte de mercancías por la utilización de determinadas infraestructuras. Esta Directiva junto con la Directiva 2011/76/UE y la modificación propuesta en el programa legislativo de la Comisión “Europa en Movimiento” del 31 de mayo de 2017, sustituyeron a la antigua Directiva 62/1999 de la “Euroviñeta” que fue, como ya se ha dicho, el punto de partida para la tarificación vial en el marco de la Unión Europea. Los principales cambios de esta Directiva respecto a la Directiva Euroviñeta se resumen en los siguientes puntos:

- Destaca que las tasas por el uso de las infraestructuras constituyen una de las muchas herramientas, como los impuestos sobre el carburante o los impuestos sobre los vehículos, para reducir los costes del transporte. Por tanto, estas medidas deben ser aplicadas como parte de estrategias integradas.
- Indica que se deben diseñar peajes que reflejen mejor los costes de transporte, definiendo con mayor grado de detalle los costes de construcción, explotación, mantenimiento, accidentes, etc.
- Establece una tarificación más diferenciada, variando los peajes según la distancia recorrida, la localización, los daños causados a las carreteras según el tipo de vehículo, la categoría EURO del vehículo, el momento y el grado de congestión del eje vial.

- Posibilita la aplicación de tasas reguladoras, no discriminatorias, destinadas a combatir los impactos ambientales en entornos urbanos.
- Autorizada a los Estado miembro a extender el ámbito de aplicación de su régimen de peaje a los vehículos de peso inferior al umbral de las 12 Tn.
- Posibilita la extensión de los peajes a la RTE-T<sup>57</sup>, así como a cualquier otra carretera a la que pueda desviarse el tráfico y que compita directamente con determinados tramos de la red.
- Subraya que los ingresos procedentes de los peajes y las tasas deben reinvertirse en el mantenimiento de la infraestructura viaria donde se aplica el peaje, así como en el sector transporte en su conjunto, teniendo en cuenta un desarrollo equilibrado de las redes de transporte.
- Establece que se podrán imponer suplementos a los peajes en las carreteras que transcurran por zonas especialmente sensibles, a condición de que estos ingresos se inviertan en el desarrollo de modos alternativos de transporte en el mismo corredor o en la misma zona.
- Permite a los Estados miembros reducir o eliminar el impuesto anual de circulación, mediante nuevas reglas más equitativas, que tengan en cuenta los costos relacionados con el uso de la infraestructura, y no sólo con su propiedad.

En España estas Directivas fueron traspuesta mediante reales Decretos, como por ejemplo el Real Decreto 286/2014, de 25 de abril, que traspone la directiva de la Euroviñeta a las autopistas en régimen de concesión de la red de carreteras del Estado español. Por su parte, en Cataluña se traspone a partir de la Ley 2/014 de medidas fiscales, administrativas, financieras y del sector público que agrega la letra e) en el artículo 29 de la Ley de Carreteras. Este nuevo apartado añade que la financiación de las inversiones y gastos de la construcción, la explotación, la mejora, la conservación, la ordenación de los accesos y, en general, las actuaciones exigidas para el buen funcionamiento de las carreteras reguladas por esta Ley, se pueden adoptar mediante “los ingresos generados por la tasa de uso de las carreteras por parte de los vehículos, legalmente establecida, en los términos y supuestos establecidos normativamente”.

El 31 de mayo de 2017 la Comisión Europea presentó una nueva propuesta de modificación de la Directiva Euroviñeta donde sigue enfatizando la necesidad de avanzar hacia la aplicación plena del “usuario pagador” y de “quien contamina paga”, para generar ingresos y asegurar la financiación para futuras inversiones en transporte. El 25 de octubre de 2018 el Parlamento Europeo aprueba provisionalmente la propuesta de modificación de la Directiva 1999/62/CE introduciendo grandes novedades como la de extender la euroviñeta a todos los todos los vehículos pesados (incluidos autobuses) y furgonetas, así como a turismos, además de regular la tarificación de los peajes de manera que tengan en cuenta la distancia recorrida y las

---

<sup>57</sup> RTE-E (Red Transeuropea de Transporte): es un conjunto planificado de redes prioritarias de transporte pensadas para facilitar la comunicación de personas y mercancías a lo largo de toda la Unión Europea.

emisiones generadas. En cambio, sigue sin introducir ninguna obligatoriedad de tarificar infraestructuras en aquellos países que no lo hacen - o lo hacen de forma parcial – de forma que pretende llegar a una situación de equilibrio que permita hacer correr a aquellos que quieran correr y no regular, para aquellos que no quieran tarificar.

### **6.2.2 La Directiva 2004/52/CE sobre la interoperabilidad en los sistemas de telepeaje**

La Directiva 2004/52/CE partió de la necesidad de lograr una tarificación de infraestructuras en la Unión Europea capaz de ser interoperable a lo largo de toda la red de transporte de la Unión Europea y de no comprometer la fluidez del tráfico.

*“Los sistemas de telepeaje deben ser interoperables y basarse en normas abiertas y públicas que estén disponibles para todos los suministradores de sistemas sobre una base no discriminatoria (Directiva 2004/52/CE, pág. 3)”.*

Hasta la aprobación de la Directiva la mayoría de los Estados miembros, que habían implantado sistemas de peaje electrónico, utilizaban equipos con tecnología de microondas de corto alcance, centrada en torno a la frecuencia de 5,8 GHz, que no eran totalmente compatibles entre sí. Por ello, los esfuerzos emprendidos por el Comité Europeo de Normalización (CEN) condujeron, en enero de 2003, a la elaboración de una serie de normas técnicas que debían facilitar la compatibilidad de los sistemas de telepeaje por microondas con frecuencias de 5,8 GHz. El problema fue que esas normas no cubrían todos los sistemas de comunicaciones especializadas de corto alcance (DSRC) de 5,8 GHz en funcionamiento en la Unión Europea, pues se basaban en el modelo de «Interconexión de sistemas abiertos», definido por la Organización Internacional de Normalización para la comunicación de sistemas informáticos.

En consecuencia, la Directiva 2004/52/CE fija las líneas maestras para que los empresarios de equipos y los gestores de infraestructuras desarrollen productos de telepeaje interoperativos, basados en las nuevas tecnologías de localización y comunicaciones, creando un servicio europeo de telepeaje.

*“En particular, debido a su gran versatilidad y flexibilidad, la aplicación de las nuevas tecnologías de localización por satélite (GNSS) y de comunicaciones móviles (GSM/GPRS), a los sistemas de telepeaje podrá servir para responder a las exigencias de las nuevas políticas de tarificación viaria previstas a escala comunitaria, así como en los Estados miembros. Estas tecnologías permiten contabilizar los kilómetros recorridos por categoría de carretera sin requerir costosas inversiones en infraestructuras. Además, estas tecnologías abren la puerta a nuevos servicios adicionales de seguridad e información para los viajeros, como la alerta automática en caso de accidente indicando la situación precisa del vehículo, y a información instantánea sobre las condiciones de circulación, la densidad del tráfico o el tiempo de viaje. En el ámbito de la localización por satélite, el proyecto Galileo, puesto en marcha por la Comunidad en 2002, está ideado para aportar, a partir de 2008, servicios de información de mejor calidad que los*

*prestados por los sistemas de navegación por satélite actuales, y que son óptimos para los servicios telemáticos de carreteras (...) (Directiva 2004/52/CE, pág. 3) ”.*

*“Se crea un servicio europeo de telepeaje que abarca toda la red de carreteras de la Comunidad en la que se perciba electrónicamente un peaje o canon de uso de carreteras. Este servicio quedará definido mediante un conjunto de normas contractuales que permitirán a todos los operadores y/o emisores ofrecer el servicio, un conjunto de normas y requisitos técnicos, y un contrato de abono único entre los clientes y los operadores y/o emisores que ofrezcan el servicio. Este contrato dará acceso al servicio en el conjunto de la red y los abonos podrán obtenerse del operador de cualquier parte de la red y/o del emisor” (Directiva 2004/52/CE, pág. 7) ”.*

Como conclusión, podemos decir que la Directiva 2004/52/CE surgió con el propósito de hacer interoperables todos los sistemas europeos de cobro de telepeaje a través de un Servicio Europeo de Telepeaje para facilitar el transporte internacional dentro de los Estado miembros. Posteriormente, para mejorar algunos aspectos relativos a la armonización de la legislación comunitaria de cara a seguir mejorando esta interoperabilidad de dispositivos de telepeaje, en mayo de 2017 la Comisión Europea adoptó una nueva propuesta para una refundición de la Directiva 2004/52/CE por la que se facilitaba el intercambio transfronterizo de información sobre el impago de cánones de carretera en la Unión.

### **6.3 Tendencias de la política de tarificación de infraestructuras en la Unión Europea**

El alto impacto del transporte por carretera en el medio ambiente, así como la degradación de la infraestructura vial, tiene un alto coste para la sociedad. La llamada Euroviñeta está desactualizada y hasta ahora no ha sido un incentivo para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector del transporte por carretera. Por todo ello, el pasado 25 de octubre de 2018, el Parlamento Europeo votó una reforma de las normas del sistema de peajes en la Unión Europea. La iniciativa de la eurodiputada francesa socialista, Christine Revault D’Allonnes Bonnefoy, pretende garantizar la igualdad del uso de las carreteras y promete ayudas a los Estados miembros para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en el sector del transporte.

La nueva reforma, que sigue la línea de la última modificación de la Directiva 2006/38/CE de 2007, propone que todos los vehículos ligeros y pesados en la Unión Europea paguen peajes en función del uso real que hagan de la infraestructura, así como del nivel de contaminación que generen. Todo apunta a que, a partir del año 2023, los peajes basados en el tiempo para camiones y autobuses se sustituirán por peajes basados en la distancia. Las nuevas tasas podrían aplicarse furgonetas y minibuses en el año 2027. Además, propone introducir, o mantener, cargos adicionales para combatir la congestión de tráfico y la contaminación en las ciudades y potenciar el transporte público.

Los cambios propuestos podrían aplicarse a los 136.706 kilómetros de carreteras y autopistas que conforman la red transeuropea de transporte aunque sólo donde ya existan peajes a pesar de que los Estados miembros seguirán teniendo la decisión final de implementar o no estas nuevas tarifas.

#### **6.4 La Unión Europea y los peajes urbanos**

En el ámbito de la regulación sobre la tarificación de infraestructuras en entornos urbanos hay que destacar que la Unión Europea, inspirada por los resultados positivos que en las últimas décadas han ofrecido los sistemas de peaje urbano en funcionamiento<sup>58</sup>, ha ido trabajando de forma activa para impulsar y promover la implantación de peajes urbanos en las grandes ciudades del entorno de la UE, como instrumento de gestión decisivo para abordar el problema de la congestión y de la mala calidad ambiental (Carrasco et al., 2012).

La primera referencia sobre la necesidad de implantar sistemas de peaje urbano se plantea de forma clara a través del ya mencionado Libro Blanco de 2001.

*“En paralelo al desarrollo de nuevos medios de transporte público, la reducción de la congestión en las ciudades requiere también la instauración de sistemas de tarificación para el uso de infraestructuras en el contexto urbano, cuya expresión más sencilla es la tarificación del aparcamiento. Existen fórmulas más elaboradas que están examinando algunas grandes ciudades, como Londres, creando un sistema de peaje basado en una tecnología de identificación electrónica de los coches y en un sistema electrónico de recogida de cánones, que podrían armonizarse a escala comunitaria. Ahora bien, la población local sólo aceptará los peajes urbanos si las alternativas de transporte público son competitivas en cuanto a servicios e infraestructuras. Por consiguiente, es fundamental utilizar los ingresos obtenidos para contribuir a la financiación de nuevas infraestructuras que mejoren la oferta general de transporte urbano (Libro Blanco, pág. 94)”*

En este sentido, dentro de las medidas prioritarias relativas al fomento de buenas prácticas, el Libro Blanco de 2001 ya recomendaba la implantación de peajes urbanos similares al de Londres. Además, encomendaba a utilizar sus ingresos para potenciar el transporte público urbano y mejorar su aceptabilidad pública.

Dichos pronunciamientos se consolidan y refuerzan a través del Libro Verde de la CE publicado el 25 de septiembre de 2007 “Hacia una nueva cultura de la movilidad urbana”, y más concretamente, a través del “Plan de acción de Movilidad Urbana” que establece una serie de medidas a seguir para el desarrollo de sistemas de peaje urbano. Algunas de ellas son realizar estudios que desarrollen metodologías de cálculo para la internalización de los costes externos urbanos, investigar sobre los tipos de tarifas y tecnologías a

---

<sup>58</sup> Fundamentalmente, como ya se ha comentado, los peajes urbanos nórdicos y del Reino Unido.

aplicar, ver el impacto de la medida en la aceptabilidad pública, así como, desarrollar estudios detallados sobre la eficacia de los peajes urbanos en funcionamiento.

Respecto al desarrollo de estudios sobre las experiencias de peajes urbanos en funcionamiento hay que destacar un conjunto de proyectos financiados por la Comunidad Europea que pretendían explorar aspectos técnicos, financieros, políticos y sociales relacionados con la ejecución e implantación de este tipo de sistemas. Algunos de ellos fueron:

- El proyecto EUROPRICE que constituyó una red integrada por una serie de ciudades europeas con el propósito común de aportar iniciativas sobre la tarificación vial en el ámbito de sus respectivas áreas urbanas. El proyecto EUROPRICE pretendía realizar pruebas piloto de peajes urbanos en las ciudades de Dublín, Londres, Atenas y el modelado en la ciudad de Budapest.
- El Proyecto PROGRESS quería demostrar la eficacia de los peajes urbanos como herramientas para desarrollar sistemas de transportes urbanos sostenibles. El proyecto promovió las pruebas y experimentaciones de sistemas de peaje urbano en las ciudades de Bristol, Copenhague, Edimburgo, Génova, Gotemburgo, Helsinki, Roma y Trodheim. Algunas de estas ciudades como Roma y Trodheim ya tenían sistemas de peaje y otras como Edimburgo y Bristol tenían planes muy avanzados para su introducción (Jensen-Butler et al., 2008).
- El proyecto CUPID<sup>59</sup> (Coordinating Urban Pricing Integrated Demonstration) cuyo objetivo principal fue proporcionar un conocimiento avanzado sobre los sistemas de peajes urbanos, a través de una evaluación de los resultados obtenidos en otros proyectos como el proyecto PROGRESS. Estos resultados se utilizarían para difundirlos y utilizarlos para producir recomendaciones de políticas sólidas que sirvieran a otras ciudades interesadas en implantar sistemas de peajes urbanos.
- El proyecto CURACAO<sup>60</sup> (Coordination of Urban Road user Charging Organisational issues) por su parte, además de garantizar la continuidad de los trabajos de investigación de los proyectos anteriores, trató de coordinar la investigación y el seguimiento de los resultados relativos a peajes urbanos con el fin de proporcionar una herramienta útil para la implantación de este tipo de sistemas como instrumento efectivo para la gestión de la demanda de movilidad.

---

<sup>59</sup> Para más información se puede consultar la web: <https://trimis.ec.europa.eu/project/co-ordinating-urban-pricing-integrated-demonstrations>

<sup>60</sup> Para más información se puede consultar la web <http://www.isis-it.net/curacao/index.asp>

## **7. LA CONGESTIÓN Y EL PEAJE URBANO COMO MEDIO PARA LA MEJORA DEL ENTORNO URBANO**

### **7.1 Introducción**

Los problemas de congestión de tráfico en ciudades han ido en aumento durante los últimos años y todo indica que la tendencia continuará igual. Este hecho no sólo constituye un problema cada vez mayor sobre la calidad de vida de las personas, sino que también provoca un deterioro continuo del entorno urbano. Una de las principales manifestaciones de la congestión es la progresiva reducción de las velocidades de circulación que se traduce en: incrementos del tiempo de viaje, aumentos del consumo de combustibles, encarecimiento de los costes de operación y generación de una creciente contaminación atmosférica. Según (Bel, 1995), la congestión es la situación en que los usuarios de modos de transporte interfieren entre sí, produciéndose una disminución de la velocidad de viaje en el trayecto recorrido. En el contexto de los diferentes tipos de externalidad, (Rothenberg, 1970) define la congestión de forma sencilla y directamente aplicable a la actividad del transporte: «Si el tráfico viario es el ejemplo clásico de congestión, el hecho distributivo interpersonal es que todos los usuarios están usando el medio (el bien público) en la misma forma, perjudicando la calidad del servicio para el resto y para sí mismo, y el ratio entre su perjuicio y el del resto es el mismo para todos los usuarios .... El conjunto de usuarios pierde homogéneamente por su interacción autoimpuesta». (Vickrey, 1969) distingue hasta seis tipos de congestión: congestión por interacción simple, congestión por interacción múltiple, congestión por cuello de botella, congestión desencadenada, congestión en situación de red-control y congestión en situación de densidad general.

La congestión es causada principalmente por el uso intensivo del automóvil, cuyo uso ha ido en aumento durante los últimos años. El automóvil posee ventajas en términos de facilitar la movilidad personal y otorgar sensación de seguridad, así como de estatus, especialmente en países en vías de desarrollo. Sin embargo, es poco eficiente para el traslado de personas. Cada ocupante en automóvil produce, en las horas punta, unas once veces la congestión atribuible a cada pasajero en autobús. Los efectos perjudiciales de la congestión recaen directamente sobre los vehículos que circulan. Pero además de los automovilistas, sufren su efecto los pasajeros del transporte colectivo, generalmente personas de ingresos menores, que no sólo se ven atrasados en sus desplazamientos, sino que a causa de la congestión ven incrementados los valores de las tarifas que pagan. Además, reciben perjuicios todos los habitantes de las urbes, en términos de deterioro de su calidad de vida en aspectos tales como mayor contaminación acústica y atmosférica, impacto negativo sobre la salud y sostenibilidad de las ciudades a largo plazo, todo lo cual hace necesario mantener la congestión bajo control (Bull, 2003).

En Europa el uso creciente del automóvil no ha sido una excepción, a pesar del continuo aumento del precio del combustible. Por ello, muchos planificadores entienden que el uso de medidas fiscales sobre el tráfico es útil para mantener la congestión en un nivel razonable (Rich, Jeppe and Anker Nielsen, 2007). (Eliasson,

2009) nos demuestra que el peaje urbano puede ser una buena herramienta para luchar contra la congestión, aunque un mal diseño del mismo puede producir efectos contrarios. La tarifa por congestión produce un excedente social a un nivel agregado, pero también tiene limitaciones físicas, técnicas, económicas o políticas que restringen alcanzar una tarifa por congestión óptima. Ya hemos visto que existen ciudades como Londres o Estocolmo que, con la ayuda del peaje urbano, han logrado reducir con éxito la congestión; pero también hemos visto que existe un problema de transferibilidad de resultados de un lugar a otro donde el nivel de congestión y la estructura urbana podría ser puntos esenciales.

## 7.2 El reto de la mejora de la calidad del aire

Además de la congestión vehicular, la contaminación atmosférica es otro de los grandes problemas que aquejan a las ciudades modernas, especialmente en países en desarrollo. La contaminación se produce porque las emisiones contaminantes, de las que los vehículos son responsables en una fracción importante, sobrepasan la capacidad de absorción y dilución de la cuenca en que se ubica la ciudad. Por lo tanto, será razonable esperar que las políticas de transporte y las medidas para reducir la congestión en una ciudad tengan también efecto en la contaminación atmosférica. Los principales contaminantes atmosféricos son las partículas en suspensión, el dióxido de azufre, el monóxido de carbono, el ozono, los óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles. Además, muchos metales pesados se encuentran presentes en el material particulado en la atmósfera. Los contaminantes atmosféricos pueden tener variados efectos. Los principales son la incidencia en la salud de la población, los perjuicios a la vegetación y ecosistemas, los daños a materiales, y la reducción de visibilidad (Bull, 2003). No existen ya dudas de que la contaminación atmosférica produce efectos nocivos en la salud de la población y numerosos estudios epidemiológicos realizados en los últimos 30 años lo han demostrado. En la siguiente tabla se muestran los problemas de salud derivados de los contaminantes atmosféricos:

PROBLEMAS DE SALUD QUE AUMENTAN SU INCIDENCIA POR EFECTO DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS	
Efectos cuantificables	Efectos aún no cuantificables
Mortalidad (adultos mayores)	Inducción de asma
Mortalidad (infantil)	Efectos de desarrollo fetales/neonatales
Mortalidad neonatal	Mayor sensibilidad de vías respiratorias
Bronquitis - crónica y aguda	Enfermedades respiratorias crónicas (no bronquitis)
Ataques de asma	Cáncer
Admisiones hospitalarias (respiratorias y cardiovasculares)	Cáncer pulmonar
Visitas a sala de urgencia	Efectos conductuales
Enfermedades respiratorias (altas y bajas)	Desórdenes neurológicos
Síntomas respiratorios	Exacerbación de alergias
Días de ausentismo laboral	Alteración de mecanismos de defensa
Días con actividad restringida	Daño a células respiratorias
	Menor tiempo de desarrollo de angina
	Cambios morfológicos en el pulmón
	Arritmia cardiovascular

Tabla 25 Efecto de los contaminantes atmosféricos sobre la salud. Fuente: (Bull, 2003)

En Europa, con el fin de reducir la emisión de compuestos contaminantes, la Unión Europea ha desarrollado una serie de normativa en aras de mitigar el efecto de la contaminación atmosférica en los Estados miembros.

### **7.2.1 La normativa europea sobre calidad y evaluación del aire.**

La Unión Europea, a través de sus políticas, ha logrado en los últimos años grandes avances en la lucha contra la contaminación atmosférica, con reducciones importantes en las emisiones anuales de gases contaminantes en Europa. A pesar de estos avances, la Unión Europea sigue luchando para reducir los importantes efectos negativos y riesgos para la salud humana y el medio ambiente derivados de la presencia de ciertos contaminantes atmosféricos. La normativa actual en Europa, sobre calidad y evaluación del aire, tiene su origen en la Directiva 96/62/CE del Consejo, de 27 de septiembre de 1996. Esta directiva, también llamada Directiva Marco, fue la primera norma en adoptar un planteamiento general y en fijar unos criterios, objetivos y técnicos, de evaluación ambiental. Posteriormente a través de las conocidas como Directivas Hijas, la mayor parte de las cuales ya han sido sustituidas por normas posteriores, se desarrolló y particularizó la Directiva Marco para los diferentes grupos de contaminantes. A continuación, se citan algunas de las distintas directivas europeas sobre calidad del aire:

- Directiva 2016/2284 del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de diciembre de 2016 relativa a la reducción de las emisiones nacionales de determinados contaminantes atmosféricos, por la que se modifica la Directiva 2003/35/CE y se deroga la Directiva 2001/81/CE.
- Directiva 2015/1480/CE de la Comisión de 28 de agosto de 2015, por la que se modifican varios anexos de las Directivas 2004/107/CE y 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en los que se establecen las normas relativas a los métodos de referencia, la validación de datos y la ubicación de los puntos de muestreo para la evaluación de la calidad del aire ambiente.
- Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa.
- Directiva 2004/107/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de diciembre de 2004, relativa al arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire ambiente.

De todas las anteriores directivas, a continuación, nos centraremos en la vigente Directiva 2016/2284 que establece el techo de emisiones de contaminantes a los Estados miembros obligándoles a limitarlas entre, 2020 y 2030, «al menos, sus emisiones antropogénicas anuales de dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles no metálicos, amoníaco y partículas finas, de acuerdo con sus compromisos nacionales de reducción de emisiones aplicables». Los Estado miembros deberán llevar a cabo esta reducción de forma lineal o progresiva partiendo de los compromisos de reducción de emisiones fijados para el periodo 2020-2030 que podemos ver en la Tabla 26.

ANEXO II

COMPROMISOS NACIONALES DE REDUCCIÓN DE EMISIONES

Cuadro A

Compromisos de reducción de las emisiones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y de compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM). Los compromisos de reducción tienen 2005 como año de referencia, y para el transporte por carretera, se aplican a las emisiones calculadas en función de los combustibles vendidos (\*).

Estado miembro	Reducción de las emisiones de SO <sub>2</sub> en comparación con 2005		Reducción de las emisiones de NO <sub>x</sub> en comparación con 2005		Reducción de las emisiones de COVNM en comparación con 2005	
	Para cualquier año entre 2020 y 2029	Para cualquier año a partir de 2030	Para cualquier año entre 2020 y 2029	Para cualquier año a partir de 2030	Para cualquier año entre 2020 y 2029	Para cualquier año a partir de 2030
Bélgica	43 %	66 %	41 %	59 %	21 %	35 %
Bulgaria	78 %	88 %	41 %	58 %	21 %	42 %
Chequia	45 %	66 %	35 %	64 %	18 %	50 %
Dinamarca	35 %	59 %	56 %	68 %	35 %	37 %
Alemania	21 %	58 %	39 %	65 %	13 %	28 %
Estonia	32 %	68 %	18 %	30 %	10 %	28 %
Grecia	74 %	88 %	31 %	55 %	54 %	62 %
España	67 %	88 %	41 %	62 %	22 %	39 %
Francia	55 %	77 %	50 %	69 %	43 %	52 %
Croacia	55 %	83 %	31 %	57 %	34 %	48 %
Irlanda	65 %	85 %	49 %	69 %	25 %	32 %
Italia	35 %	71 %	40 %	65 %	35 %	46 %
Chipre	83 %	93 %	44 %	55 %	45 %	50 %
Letonia	8 %	46 %	32 %	34 %	27 %	38 %

**Tabla 26. Compromisos nacionales de reducción de dióxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y de compuestos volátiles no metánicos. Fuente: Diario Oficial de la Unión Europea de 17 de diciembre de 2016.**

Para el caso español, el compromiso adquirido es reducir un 67% las emisiones de dióxido de azufre, un 18% las de óxidos de nitrógenos y un 10% las de compuestos orgánicos volátiles no metánicos, con respecto a los niveles del año 2005 dentro de cualquier año comprendido entre 2020 y 2029.

Los Estados miembros, que estimen conveniente cumplir los compromisos de forma no lineal, deberán motivarlo adecuadamente y aquellos que no consideren posible alcanzar la reducción establecida, estarán obligados a dar cuentas de forma más continuada y exhaustiva haciendo todo lo necesario para acercarse al cumplimiento a la mayor brevedad posible.

La Directiva 2016/2284 también introduce la necesidad de una renovación de los programas nacionales de control de la contaminación atmosférica, para que se adapten a los cambios europeos previstos, así como el deber de que sean actualizados cada 4 años. Por otro lado, la nueva directiva prevé la creación de un “Foro Europeo Aire Puro” con el fin de poder «reunir periódicamente a todas las partes implicadas, incluidas las autoridades competentes de los Estados miembros en todos los niveles pertinentes: la Comisión, la industria, la sociedad civil y la comunidad científica, para realizar aportaciones a efectos de orientar y facilitar la aplicación coordinada de la legislación y las políticas de la Unión relacionadas con la mejora de la calidad del aire».

## 7.2.2 La calidad del aire en Europa según la Agencia Europea del Medio Ambiente

La AEMA<sup>61</sup> publica anualmente un informe que recoge el análisis actualizado, basado en datos oficiales de más de 2500 estaciones de medida en toda Europa, sobre la calidad del aire en Europa. El pasado año 2019 publicó el informe “La calidad del aire en Europa - Informe 2019” del que seguidamente expondremos las conclusiones más relevantes.

En general, los datos revelan que la calidad del aire en Europa mejora lentamente, gracias tanto a las políticas pasadas y presentes como a los avances tecnológicos. A pesar de ello se siguen superando los límites de contaminantes recomendados por la Unión Europea o la Organización Mundial de la Salud (OMS) en muchas zonas de Europa. Es el caso de las partículas en suspensión PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub> donde se han superado los valores límite diarios recomendados en varios Estados miembros de la Unión Europea. La Tabla 27 indica el porcentaje de población dentro de los 28 Estados miembros (EU-28) expuestos a concentraciones superiores de polución según los límites marcados por la Unión Europea y la OMS.

Pollutant	EU reference value (*)	Urban population exposure (%)	WHO AQG (*)	Exposure estimate (%)
PM <sub>10</sub>	Day (50)	13-19	Year (20)	42-52
PM <sub>2,5</sub>	Year (25)	6-8	Year (10)	74-81
O <sub>3</sub>	8-hour (120)	12-29	8-hour (100)	95-98
NO <sub>2</sub>	Year (40)	7-8	Year (40)	7-8
BaP	Year (1)	17-20	Year (0.12) RL	83-90
SO <sub>2</sub>	Day (125)	< 1	Day (20)	21-31
Key	< 5 %	5-50 %	50-75 %	> 75 %

**Tabla 27. Porcentaje de población urbana en la EU-28 expuesta a concentraciones de contaminantes atmosféricos por encima de las concentraciones de referencia de la EU y la OMS (mínimo y máximo observado entre 2015 y 2017). Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente.**

Las elevadas concentraciones de contaminantes atmosféricos siguen afectando significativamente a la salud de los europeos, particularmente en las zonas urbanas. Los contaminantes más perjudiciales siguen siendo las partículas en suspensión (PM), el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y el ozono troposférico (O<sub>3</sub>). Según el informe, las concentraciones de PM<sub>2,5</sub> fueron responsables de una cifra estimada de 412.000 muertes prematuras en 41 países europeos en 2016, de las que en torno a 374.000 se produjeron en la Unión Europea. La mala calidad del aire también tiene repercusiones económicas importantes, ya que incrementa los gastos médicos, reduce la productividad laboral y daña el suelo, los cultivos, los bosques, los lagos y los ríos. La Figura 44 muestra los puntos en color rojo, correspondientes a las dos últimas categorías, que exceden el valor límite anual de PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>10</sub> recomendado por la Unión Europea. Del mismo modo, en la Tabla 44 podemos apreciar en rojo las zonas donde se han superado los límites recomendados de NO<sub>2</sub>.

<sup>61</sup> AEMA, abreviatura de Agencia Europea del Medio Ambiente, es un organismo de la Unión Europea cuya labor es ofrecer información sólida e independiente sobre el medio ambiente. Es la fuente principal de información para los responsables del desarrollo, aprobación, ejecución y evaluación de las políticas medioambientales, y también para el gran público en general.

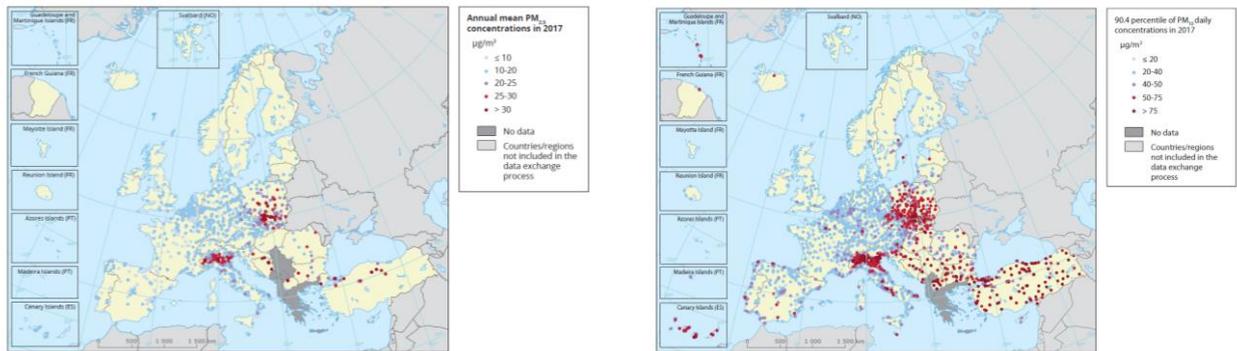


Figura 44. A la izq. concentración de PM<sub>2,5</sub> y a la derecha de PM<sub>10</sub> para el año 2017 en Europa (valor límite anual). Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente.

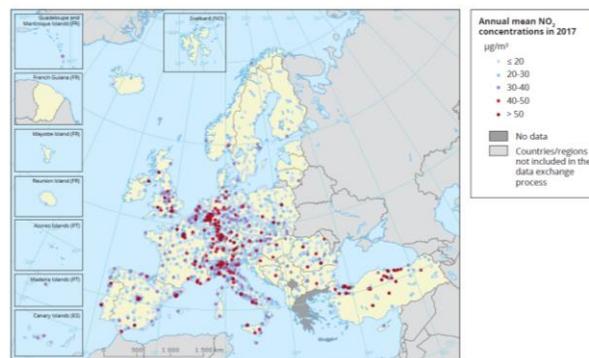


Figura 45. Concentración de NO<sub>2</sub> para el año 2017 en Europa (valor límite anual). Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente.

### 7.2.3 Barcelona y sus problemas de calidad del aire

Las medidas puestas en marcha durante los últimos años en Barcelona y en su entorno metropolitano, para mejorar la calidad del aire, no han logrado frenar a uno de los principales contaminantes atmosféricos: los óxidos de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Este peligroso contaminante está muy vinculado al tráfico y en particular a los motores diésel (Madridejos, 2018).

Según el balance del año 2017 publicado por el “Departament de Territori i Sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya” 5 de las 68 estaciones meteorológicas de la región urbana de Barcelona superaron la media anual permitida por la legislación europea, de 40 microgramos de NO<sub>2</sub> por metro cúbico de aire, y otra docena se acercaron al umbral con indicadores superiores a 35 microgramos.

El informe de “Evaluación de la calidad del aire de 2018”, elaborado por la Agencia de Salud Pública de Barcelona, a partir de ahora ASPB, muestra que se siguen superando en la ciudad de Barcelona los niveles de referencia de la OMS para los contaminantes NO<sub>2</sub>, material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>), benceno, benzo(a)pireno y ozono. En la Tabla 28 podemos ver el grado de cumplimiento en el año 2018 a partir de

los valores de referencia, marcados por la Unión Europea y la OMS, de las concentraciones medias agregadas en las estaciones de medida de (tráfico interno o fondo)<sup>62</sup> en Barcelona.

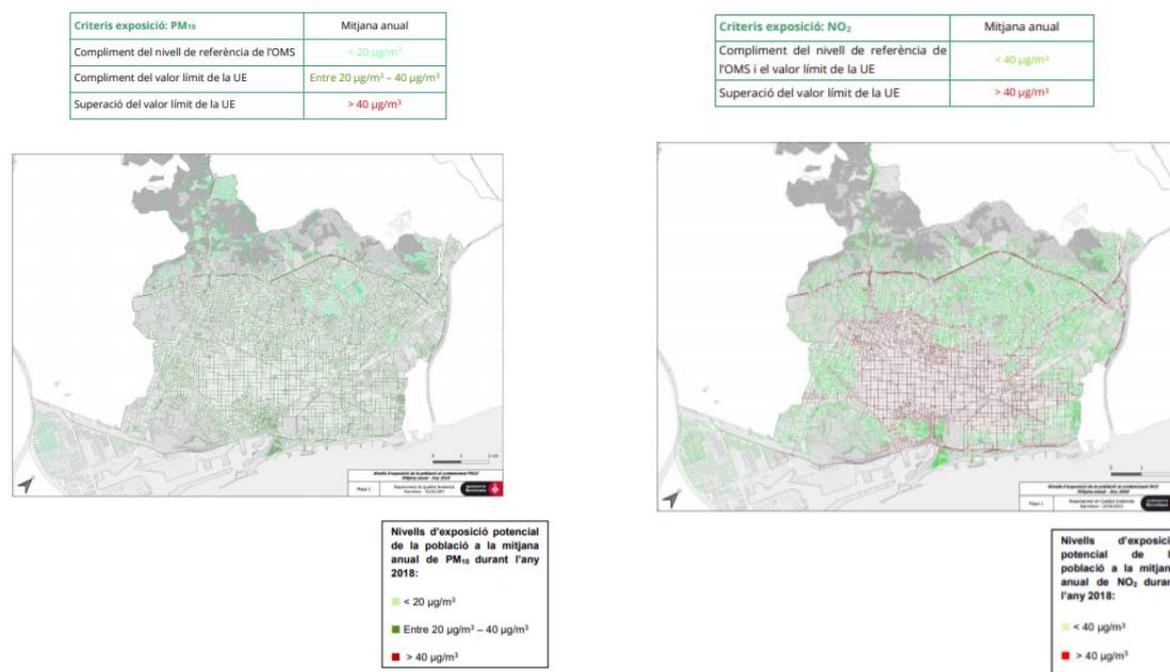
Contaminant	Trànsit		Fons	
	OMS	UE	OMS	UE
Mitjana anual NO <sub>2</sub>	Supera 1,2 vegades	Supera 1,2 vegades	No es supera	No es supera
Mitjana anual PM <sub>10</sub>	Supera 1,3 vegades	No es supera	Supera 1,1 vegades	No es supera
Mitjana anual PM <sub>2,5</sub>	Supera 1,7 vegades	No es supera	Supera 1,4 vegades	No es supera
Mitjana anual benzè	Supera 1,7 vegades	No es supera	No es supera	No es supera
Mitjana anual benzo(a)pirè	No es supera	No es supera	No es supera	No es supera
Màxim 8-horari d'ozó	Supera 1,05 vegades	No es supera	Supera 1,2 vegades	No es supera
Llindar d'informació horari d'ozó	-	S'ha superat	-	S'ha superat
Llindar d'alerta horari d'ozó	-	No es supera	-	No es supera
Màxim diari SO <sub>2</sub>	No es supera	No es supera	No es supera	No es supera

**Tabla 28. Nivel de cumplimiento en 2018 de los valores de referencia de la EU y OMS de las concentraciones medias agregadas en las estaciones de medida (tráfico interno o fondo) en Barcelona. Fuente: Agencia de Salud Pública de Cataluña.**

El informe de evaluación de calidad del aire en Barcelona, también indica que los niveles de contaminante en la ciudad, se han mantenido estables para todo el periodo 2000-2018, con superaciones sistemáticas de los niveles anuales de NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, benceno, ozono y benzo(a)pireno. En las estaciones de fondo, las concentraciones son de media un 40% superiores al nivel de referencia anual de la OMS para las partículas PM<sub>2,5</sub> y un 10% para las partículas PM<sub>10</sub>. En las estaciones de tráfico, las concentraciones son de media un 20% superiores al nivel de referencia anual de la OMS para el NO<sub>2</sub>, un 70% para las partículas PM<sub>2,5</sub> y un 30% para las partículas PM<sub>10</sub>.

Según el informe, la población potencialmente expuesta a niveles por encima de los de referencia de la OMS es del 48% en el caso del NO<sub>2</sub> y del 95% para las partículas PM<sub>10</sub> (ver Tabla 29). En superficie, los niveles de NO<sub>2</sub> se superan en el 41% de la longitud lineal de las calles y en el 88% en el caso de las PM<sub>10</sub>. Estos porcentajes presentan diferencias en función de los distintos distritos de la ciudad, siendo el distrito del Eixample el que presenta un porcentaje con mayor exposición potencial a NO<sub>2</sub> y PM<sub>10</sub>.

<sup>62</sup> Las estaciones internas de tráfico miden la contaminación en las vías principales de tráfico. Las estaciones de fondo miden la contaminación del aire, en la medida de lo posible, en las vías que no se ven afectadas por ninguna vía principal (>10.000 vehículos/día) en un radio de 300 metros.



**Tabla 29. Nivel de exposición potencial de la población a la media anual de PM<sub>10</sub> y NO<sub>2</sub> durante el 2018. Fuente: Agencia de Salud Pública de Cataluña.**

La mortalidad atribuible a la contaminación atmosférica en la ciudad de Barcelona es muy considerable para el año 2018. La Agencia de Salud Pública de Barcelona la ha estimado en al menos 350 muertes prematuras. Este impacto se debe a la exposición crónica de los niveles habituales de contaminación. Pequeñas variaciones en la concentración media anual de partículas o de dióxido de nitrógeno tienen un impacto muy relevante en la salud. En cambio, el impacto en la salud de los episodios de contaminación en Barcelona es menor. Se estima que el episodio de contaminación por PM<sub>10</sub> que afectó a la ciudad durante algunos días del 2018 no aumentó la mortalidad a corto plazo.

Todo lo expuesto anteriormente pone de manifiesto que urge una gestión más restrictiva del tráfico motorizado en Barcelona, no sólo para mejorar la calidad del aire y el entorno urbano de la ciudad, sino también para proteger la salud de la población. Las acciones no sólo deben tomarse en caso de episodios de contaminación, sino que deben ser permanentes para disminuir los niveles habituales de contaminación. Un peaje urbano como el planteado en este trabajo podría ayudar a tal efecto.

### 7.3 La necesidad de un sistema de peaje urbano como factor clave y decisivo para el desarrollo de la movilidad urbana sostenible

Actualmente el cambio de estructura en el entorno de las grandes ciudades, debido fundamentalmente al proceso de la suburbanización<sup>63</sup> extensiva, ha originado el paso de ciudades mono céntricas hacia formas

<sup>63</sup> Suburbanización: fenómeno de propagación de una ciudad y sus barrios hacia la tierra rural en la periferia de una zona urbana. Los residentes de los barrios en expansión tienden a vivir en casas unifamiliares y a conmutar en automóvil al trabajo. La baja densidad de población es un indicador de la dispersión. En este proceso de dispersión urbana hacia el ámbito rural permite el desarrollo de espacios urbanos que necesitan amplios espacios como centros comerciales, polígonos industriales, aeropuertos, centros de ocio, urbanizaciones con viviendas unifamiliares, parques y zonas verdes, etc.

más policéntricas. Esto ha motivado un cambio significativo en las pautas de movilidad, basadas en el uso intensivo del vehículo privado como modo básico de transporte. Además de lo anterior, hay que aceptar el fracaso que ha supuesto el empleo de políticas basadas en la oferta de infraestructuras como fórmula para mejorar la movilidad sostenible. Esta oferta de infraestructuras, lejos de reducir el uso del vehículo privado lo ha incrementado como consecuencia del “efecto llamada”. Si consideramos el hecho de que tampoco las políticas empleadas en la gestión de la demanda en las grandes ciudades, orientadas a la reducción de la congestión, han proporcionado resultados deseados sobre la mejora de la movilidad; parece necesario plantearse la implementación de nuevos instrumentos que permitan un mayor grado de efectividad en el desarrollo de la movilidad sostenible en estas ciudades. Uno de estos instrumentos pudiera ser el sistema de peaje urbano.

Aunque los peajes urbanos suponen, inicialmente, un elevado grado de desaceptación social, ofrecen resultados altamente positivos como parecen demostrar las experiencias internacionales actualmente vigentes. Uno de los objetivos de nuestro trabajo, pretenderá justificar la implantación de un nuevo concepto de peaje urbano, como factor clave generador de efectos positivos relevantes sobre la movilidad urbana sostenible en ciudades, y en particular en la ciudad de Barcelona.

El nuevo concepto de peaje urbano planteado en este trabajo, no busca sólo aplicar una tasa para acceder a una determinada área congestionada de la ciudad, como ocurre en la actualidad en algunas ciudades como Londres, sino que pretende ser un servicio de calidad más dentro de la misma. La idea es segregar viales de pago, con mejores velocidades de circulación, de viales gratuitos con mayores restricciones en la movilidad. El nuevo modelo, que aplicaremos particularmente sobre la ciudad de Barcelona y que respetará la trama urbana originada de la aplicación del concepto urbano de “supermanzanas” propuesto por el Ayuntamiento de Barcelona, podría constituir un instrumento que integrado en las actuales estrategias de transporte y movilidad proporcionaría efectos positivos sobre la sostenibilidad.

Previsiblemente, el nuevo modelo de peaje podría suponer una medida clave para reducir la congestión y mejorar la eficiencia económica en la totalidad de modos de transporte, proporcionando un pago más justo del servicio, ya que pagaría más aquel que hiciera más uso, promoviendo los principios marcados por la Unión Europea de “el que usa paga”. Como efecto indirecto aportaría la inducción de un conjunto de mejoras sobre el medioambiente y la habitabilidad, entre otras, que combinadas con el desarrollo de infraestructuras adecuadas pudiera servir para potenciar otros modos como son la bicicleta o caminar, todos ellos, aspectos que redundan en unas mayores cotas de movilidad urbana sostenible en la ciudad y su entorno más próximo.

## **8. EL CONCEPTO DE “CONVIVIAL CITY” O CIUDAD SOCIABLE**

### **8.1 Marco de desarrollo del nuevo modelo de movilidad**

La propuesta de peaje urbano objeto de esta tesis se inspira en el concepto “Convivial city” cuya concepción pasaremos a desarrollar. El punto clave es una nueva apreciación del tiempo de viaje. Toda la política de transporte está basada en que el transporte es una demanda derivada y que el tiempo de viaje es un tiempo “perdido” que se valora esencialmente en función del motivo del viaje. Si se hace durante el tiempo laboral el comparativo es el salario y, en general, para los otros motivos se establece también una relación con la renta. Si miramos la realidad más de cerca veremos que las decisiones se toman teniendo en cuenta muchos otros aspectos y, en particular, quién paga el viaje (Turró, 2014).

Para un empresario que “compra” tiempo del trabajador, que no puede aprovechar el tiempo de viaje para gran cosa, el criterio de coste laboral es un buen indicador de su predisposición a pagar para reducir el tiempo de viaje. En la ciudad, sin embargo, los viajes “de trabajo” representan un porcentaje modesto. Por otra parte, los ahorros de tiempo de viaje que se consiguen con la mayoría de actuaciones urbanas son relativamente pequeños y su aprovechamiento para algo beneficioso para la sociedad no es evidente; valorar los ahorros marginales de tiempo con valores medios (costes laborales medios) es un error bastante frecuente en las evaluaciones económicas de proyectos de transporte.

Para la mayoría de viajes urbanos el tiempo de viaje sustituye tiempo libre. La alternativa a pasar más tiempo moviéndose es a menudo pasar más tiempo en actividades poco productivas para la sociedad (descanso, diversión, etc.). Por otra parte, hay un problema de paro que hay que tener en cuenta incluso para los viajes de trabajo, ya que cuanto menos tiempo se pierda, menos necesidades habrá de trabajadores. El concepto que ha pervivido hasta hace poco entre los especialistas (Thisse, 2009) que dice que la demanda de velocidad está relacionada con la riqueza individual y que estamos lejos de la saturación de esta demanda, posiblemente ya no es válida, al menos en el entorno urbano. Si el viaje es agradable, o puede aprovecharse alguna actividad, la gente no quiere necesariamente ir tan rápido como sea posible. De hecho, la disponibilidad de teléfonos móviles supone para muchos usuarios del transporte público una disminución de la penalización de los viajes, ya que el tiempo en el vehículo se puede convertir en tiempo de ocio o incluso trabajo.

Así pues, en los viajes urbanos algunos factores, como la fiabilidad en el tiempo de recorrido y el aprovechamiento del tiempo de desplazamiento para otras actividades con valor individual (y por tanto colectivo), cada vez tienen sobre la demanda un peso relativamente más alto que el tiempo de viaje. Dentro del aprovechamiento del tiempo de viaje hay que incorporar también los nuevos estilos de vida y, en particular, la consideración del caminar o el uso de la bicicleta como ejercicio saludable o el cambio de percepción del paseo por la ciudad que ha representado la creación de zonas peatonales. Cuando planteamos la nueva movilidad urbana debemos tener en cuenta que el objetivo de las actuaciones públicas no debe ser

únicamente (y quizás ni siquiera principalmente) la optimización del tiempo total de viaje para una demanda determinada. Si entendemos la movilidad como una manera de satisfacer unas necesidades de desplazamiento derivadas de la vida urbana y que no exigen necesariamente las máximas velocidades, podemos integrar mejor el concepto en un modelo de ciudad que responda a los deseos del conjunto de los ciudadanos. En el estadio de desarrollo económico de las ciudades como Barcelona, ya no se justifica ligar el bienestar social solamente crecimiento de la producción y del consumo.

## **8.2 Esquema de funcionamiento de la “Convivial City”**

En la “ciudad amable” la movilidad está integrada en la vida urbana y no interfiere negativamente en ella, o lo hace lo menos posible. Por eso se plantea la eliminación de vehículos del espacio público. Simplemente eliminando el aparcamiento en la calle y dejando prácticamente sólo vehículos en circulación, restringiendo radicalmente la velocidad en las vías de proximidad, se podría conseguir recuperar una gran parte de la ciudad para usos de mayor utilidad social. La propuesta de “convivial city” remite, de alguna manera, al modelo de “super-islas” o “supermanzanas” que se ha ido planteando en Barcelona de manera recurrente desde hace décadas y últimamente con la nueva red ortogonal para los autobuses. Pero se propone ahora con una nueva filosofía, y aprovechándose de las oportunidades que ofrecen las nuevas tecnologías (Turró, 2014).

Se definiría una “red básica”, de circulación rápida y de pago que, gracias a la reducción de las molestias del tráfico con la electrificación total (en el futuro) del parque de vehículos y la provisión de aceras adaptadas, podría ser aceptada por los residentes de estas calles, quizás con una compensación en los impuestos, que podría provenir de una parte del pago de los usuarios. Habrá que permitir, en cualquier caso, un cierto acceso a los locales, residentes, etc. de estas calles rápidas y, sobre todo, pensar en las paradas de los autobuses (eléctricos o no contaminantes) que se detendrán. Por otra parte, se debe plantear un diseño de calles y cruces que permita un servicio adecuado al tráfico relativamente rápido que va a circular por esta red.

Las zonas entre vías rápidas deben permitir la recuperación del espacio viario para un uso compartido. Serán zonas peatonales o de tráfico lento que progresivamente irán perdiendo las aceras y recuperando el arbolado y las zonas de uso público, incluyendo terrazas en concesión y similares. Tenemos suficientes ejemplos de estos espacios para poder asegurar su aplicación y seguramente su éxito. La clave es eliminar el aparcamiento y reducir el paso de vehículos al mínimo necesario.

Para eliminar el aparcamiento habrá que reducir el parque de vehículos. En una primera fase, se deberá sacar de la ciudad el gran número de vehículos que se utilizan muy poco. Son, sobre todo, los que podemos denominar como “segundos coches”. Son automóviles que en las grandes ciudades se utilizan, sobre todo, para movimientos urbanos. Algunos de los viajes que se hacen pueden ser transferidos al transporte colectivo, pero hay otros que, por una diversidad de motivos, requieren un vehículo privado (dificultades

de movilidad, cargas y servicio público inadaptado, entre otras). En este caso, a diferencia del vehículo principal, que tiene todavía una connotación de estatus, no parece que la propiedad del vehículo sea un factor esencial de la demanda. De hecho, el taxi puede representar hoy en día una opción incluso más económica que la propiedad del coche y el coste del aparcamiento, pero que no se adopta por una mala percepción de los costes reales de la movilidad.

El segundo coche puede ser sustituido con relativa facilidad por el sistema de “car-sharing”<sup>64</sup>, que tiene muchas ventajas con relación al patrón de movilidad actual, en particular si los coches compartidos son eléctricos. En el futuro será el propio vehículo (de conducción automática) el que se acercará al origen del viaje y llevará a los usuarios al destino. Mientras se impone el vehículo autónomo para esta función, será el viajero conductor quien podrá optar por ir a buscar un coche compartido en el aparcamiento más cercano y dejarlo en el más adecuado cerca de dónde se quiere ir. El vehículo ocupa así la vía pública sólo cuando se utiliza y un mismo vehículo puede dar el servicio que actualmente proporciona un número mucho más elevado de “segundos coches”. El parque automovilístico de la ciudad prácticamente podría mermar en una cuarta parte y reducir sustancialmente el número de taxis circulando por la ciudad. Puede pensarse que el sistema actual de servicio de taxis se vería afectado por la propuesta y ciertamente sería así, pero de manera gradual. En la ciudad del futuro el tener una persona dedicada a llevar a otra (o dos o tres) cuando una máquina lo puede hacer más eficientemente no tiene muchas posibilidades de pervivencia.

El automóvil se plantea, en un entorno de movilidad inteligente, como el vehículo familiar (“primer coche”) que se utiliza principalmente para viajes interurbanos y algunos viajes urbanos especiales que pidan utilizar un vehículo propio y quizás más grande que los colectivos. El servicio de coche compartido tradicional puede reducir la propiedad de “primeros coches”, pero esto exige profundizar mucho más en el cambio de visión del automóvil como principal objeto de consumo personal y familiar. Los viajes en el vehículo principal normalmente se querrán hacer con rapidez, por lo que utilizarán las vías rápidas de pago. El modelo de pago por uso debe basarse en una fórmula mucho más lógica que la actual, que grava la propiedad, pero no el uso, y deberá vincularse a los efectos externos que produzca el vehículo (ya que, en la ciudad, no podemos relacionarlo con los costes de inversión, como es el caso de las autopistas). La tarificación debería vincularse a la contaminación del vehículo (penalizando los de motor de combustión tradicionales) y podría relacionarse con la congestión de las vías principales (ya que la información sobre la congestión y pues el tiempo de viaje y del coste del desplazamiento serán on-line). No estarán relacionadas con el servicio, puesto que, cuanta más congestión y, por tanto, el tiempo de viaje sea mayor, se pagará más<sup>65</sup>. Los vehículos de “car-sharing” incorporarán estos costes en su alquiler, que se pagará con el mismo dispositivo (Smart card) que el transporte colectivo y otros servicios urbanos. Los viajeros que no necesiten un servicio motorizado individual (coche/moto privados, coche compartido o taxi) que se

---

<sup>64</sup> El car-sharing o uso temporal de vehículos es un modelo de alquiler de automóviles en el que el usuario alquila el vehículo durante cortos períodos de tiempo, habitualmente por una hora. Es atractivo para aquellos clientes que quieran hacer uso ocasional de un vehículo y para aquellas otras que quieran un acceso puntual a un tipo de coche diferente al que usan día a día.

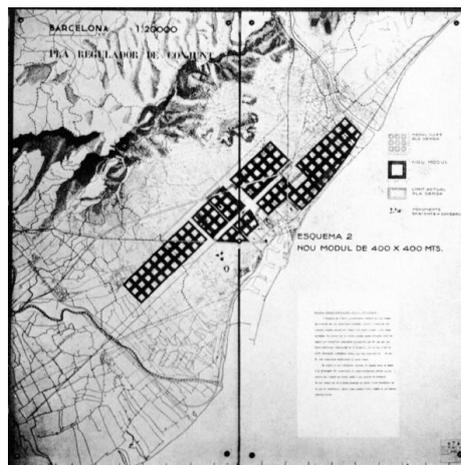
<sup>65</sup> No es, por tanto, planteable un modelo comercial convencional. Lo que implica, por lo menos, una fuerte regulación por parte del sector público.

pueda considerar rápido, o que no quieran o puedan pagarlo, tendrán siempre las opciones de la marcha a pie, el “bicing”<sup>66</sup> (motorizado o no) o un transporte colectivo que debe proporcionar un servicio adecuado a toda la zona urbana.

### 8.3 El modelo urbano de BCN Ecología. La “supermanzana”

Una gran parte del centro de la ciudad de Barcelona, llamada el Eixample y diseñada a mediados del siglo XIX por Ildefons Cerdà, el padre del urbanismo moderno, está estructurada en islas edificatorias (manzanas) de forma cuadrada con los ángulos de las esquinas cortados formando chaflanes, lo que facilita la visibilidad y los movimientos hacia las vías laterales. Estas islas tienen unas dimensiones de unos 113 metros de lado y ofrecen numerosas ventajas desde el punto de vista funcional y de la movilidad.

Sin embargo, a pesar de que el Plan Cerdà<sup>67</sup> ha marcado con éxito la forma de organizar la ciudad de Barcelona durante más de 150 años, por el camino surgió algún estudio orientado en el ámbito de la sostenibilidad urbana, como el Plan Macià<sup>68</sup>, que apuntó a desarrollar un nuevo orden geométrico de la ciudad, con el que tejer la nueva capital catalana, mediante la agrupación de las manzanas de Cerdà formando cuadrados edificatorios de 400x400 (3x3 manzanas).



**Figura 46. Plan Macià (1935). Plan regulador de conjunto de la nueva ciudad. Estado definitivo. Trazado en la totalidad con un nuevo módulo de 400x400. Fuente: (Salvador Tarragó Cid, 1980).**

<sup>66</sup> El Bicing es un servicio de alquiler de bicicletas públicas en la ciudad de Barcelona que se implantó en marzo de 2007, promovido por el Ayuntamiento que utiliza un sistema de estaciones y bicicletas similar al de Estocolmo, Oslo o BiZi de Zaragoza.

<sup>67</sup> El Plan Cerdà fue un plan de reforma y ensanche de la ciudad de Barcelona de 1860 que seguía criterios del plan hipodámico, con una estructura en cuadrícula, abierta e igualitaria. Fue creado por el ingeniero de caminos, canales y puertos Ildefonso Cerdà. Su diseño innovador y vanguardista lo han convertido en uno de los hitos del urbanismo barcelonés. El ensanche contemplado en el plan se desplegaba sobre una inmensa superficie que estaba libre de construcciones al ser considerada zona militar estratégica. Proponía una cuadrícula continua de manzanas de 113,3 metros desde el Besós hasta Montjuic, con calles de 20, 30 y 60 metros con una altura máxima de construcción de 16 metros. La novedad en la aplicación del plan hipodámico consistía en que las manzanas tenían chaflanes de 45° para permitir una mejor visibilidad.

<sup>68</sup> El Plan Macià fue un proyecto urbanístico diseñado entre 1932 y 1935 por los arquitectos Josep Lluís Sert y Le Corbusier, pensado para la ciudad de Barcelona. Aunque finalmente no fue ejecutado, el proyecto quedó como un esbozo de desarrollo urbanístico de estilo racionalista bastante adelantado para su época. El nombre del proyecto viene del entonces presidente de la Generalidad de Cataluña, Francesc Macià. El plan preveía una distribución funcional de la ciudad con un nuevo orden geométrico, a través de grandes ejes vertebradores ya implícitos en el Plan Cerdà como la Gran Vía, la Meridiana y el Paralelo, y con una nueva fachada marítima definida por rascacielos cartesianos, además de la mejora de equipamientos y servicios, el fomento de la vivienda pública y la creación de un gran parque y centro de ocio junto al delta del Llobregat, la llamada Ciudad de Reposo y Vacaciones.

En la misma línea, pero más recientemente, el Ayuntamiento de Barcelona y concretamente la Agencia de Ecología Urbana de Barcelona<sup>69</sup> han trabajado en una nueva célula urbana de movilidad para Barcelona, de mayor tamaño que la actual y llamada “supermanzana”, con unas dimensiones diseñadas a escala de vehículo y no a la escala de peatón. De esta forma el Ayuntamiento pretende compatibilizar la circulación vehicular con la movilidad del peatón y la bicicleta.

La idea se adaptó teniendo en cuenta que la movilidad del vehículo y la movilidad del peatón son realidades muy distintas, y que el modelo urbanístico actual de Barcelona, que utiliza toda la trama urbana vial para el tráfico rodado, no es adecuado. Diferenciando una trama vial de circulación vehicular y una trama urbana de circulación de peatones, sería posible mejorar la situación tanto para automóviles como para peatones.

En las siguientes figuras se representa, por un lado, a la izquierda la situación actual del modelo urbanístico de manzanas en la ciudad de Barcelona y, por otro, a la derecha la nueva situación propuesta por el Ayuntamiento de Barcelona, donde se amplía la dimensión de la manzana eliminando la circulación interior y sólo permitiendo circulación vehicular en el perímetro de la nueva celda urbana.

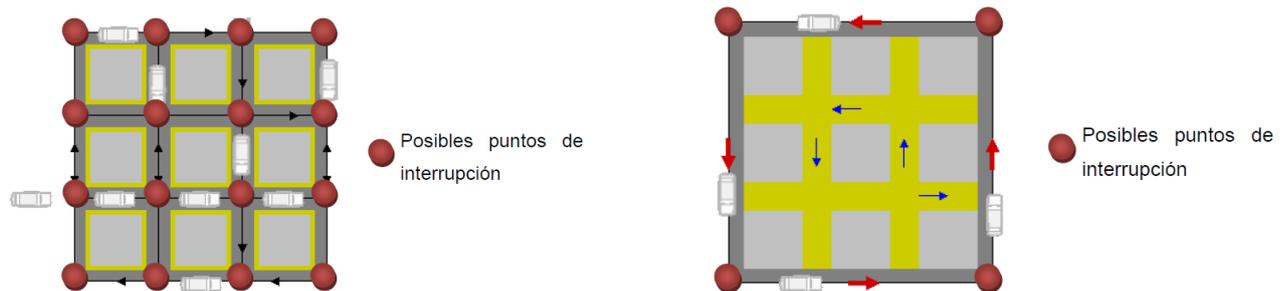


Figura 47. Situación actual (a la izq.) y nueva propuesta (a la derecha) de célula urbana para Barcelona. Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona.

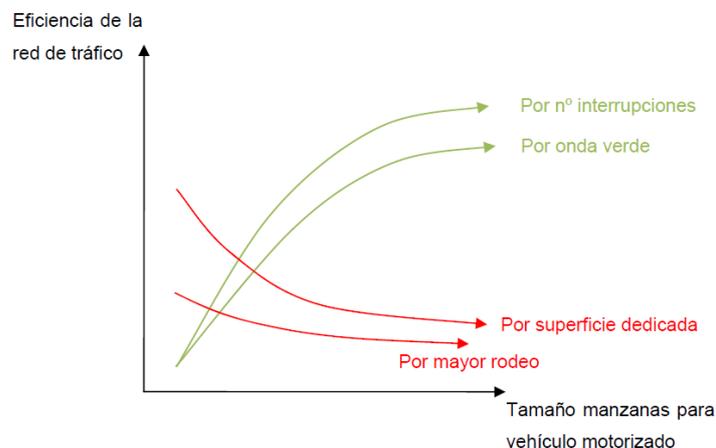
La formación de la nueva célula urbana se basa en la idea de agrupar las antiguas manzanas en células de 6, 9 y hasta 16 unidades formando la “supermanzana”. Esta nueva supermanzana, que no se podría atravesar directamente en vehículos privado, se diseña estableciendo sentidos de circulación que dificultan la utilización de los tramos interiores de calles. En la siguiente figura podemos ver como con la supermanzana se incrementa sustancialmente el viario para el peatón y para usos públicos.

<sup>69</sup>Actualmente conocido como BCNEcología es un Consorcio público formado por el Ayuntamiento de Barcelona, Área Metropolitana de Barcelona (AMB) y la Diputación de Barcelona.



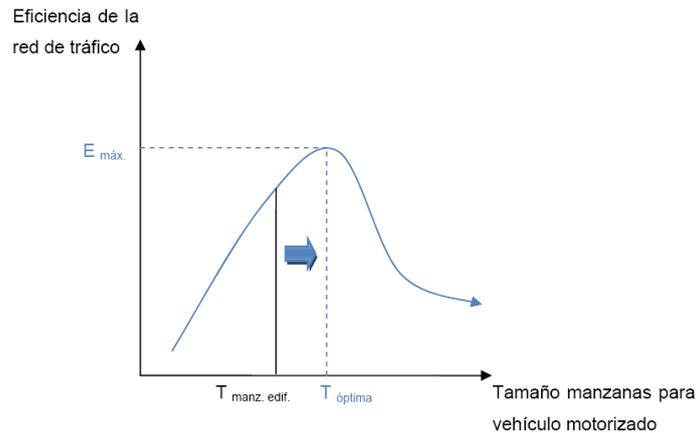
**Figura 48. Sistema actual (a la izq.) y nueva supermanzana (a la derecha). Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona.**

Según BCNEcología, el nuevo concepto urbanístico supondría una serie de efectos positivos, pero también negativos. Entre los efectos positivos, la supermanzana ayudaría a incrementar la eficiencia de la red de transporte por la disminución del número de interrupciones, además posibilitaría una mejor coordinación semafórica al reducir el número de cruces. Por el contrario, entre los efectos negativos, provocaría una reducción de la superficie dedicada al tráfico rodado, sobre todo de medio/largo recorrido, que disminuiría la capacidad de la red, además debido a la dificultad de acceder de forma directa a la supermanzana se produciría un alargamiento de los trayectos. Estos efectos dependerían, lógicamente, del tamaño de las células. En la siguiente figura podemos ver una representación gráfica de estos conceptos.



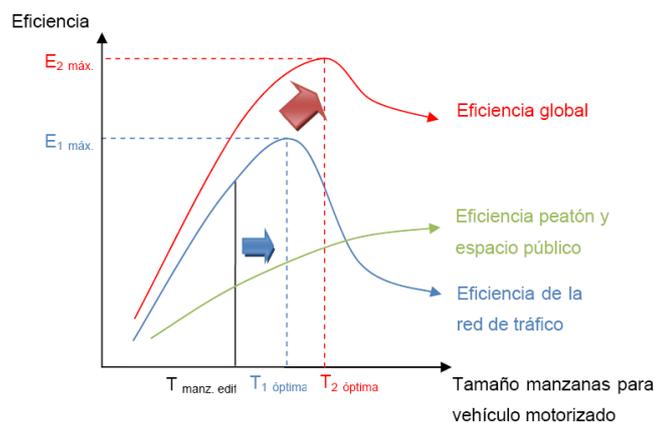
**Figura 49. Eficiencia red tráfico vs tamaño de isla para vehículo motorizado. Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona.**

Otra de las conclusiones a las que ha llegado BCNEcología es que, desde el punto de vista de la eficiencia de la red de tráfico, con un número de islas edificatorias superior a 16 sería muy difícil implementar la medida. Además, el tamaño óptimo de isla no tiene por qué coincidir con los valores necesariamente discretos del número de islas edificatorias que, esencialmente, pueden ser 4, 6, 8, 9, 12 ó 16.



**Figura 50. Tamaño óptimo de manzana. Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona.**

Por otra parte, ha observado que a medida que aumenta el tamaño de las supermanzanas aparecen otros factores, como la mayor liberación de espacio para uso público y para el peatón y bicicleta, que modificarían la eficiencia global del sistema. Estos efectos implican que la medida se tenga que adoptar con prudencia y con un soporte importante de estudios de tráfico que garanticen la eficiencia final del sistema de transporte de la ciudad.



**Figura 51. Eficiencia global del sistema. Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona.**

En el caso de Barcelona, el modelo ha sido aplicado con éxito en el Distrito de Gracia<sup>70</sup>, que más adelante detallaremos, donde se ha demostrado que la red básica ha sido suficiente para absorber el tráfico motorizado y se ha podido recuperar el resto de calles para otros fines. En la siguiente figura se muestra cómo, el nuevo escenario de supermanzanas en el barrio de Gracia, ha logrado reducir el tráfico rodado a la vez que lo ha desplazado desde la red secundaria (más local) hacia la red básica de transporte.

<sup>70</sup> Para más información se puede consultar la web: <http://ajuntament.barcelona.cat/superilles/es/superilla/gracia>

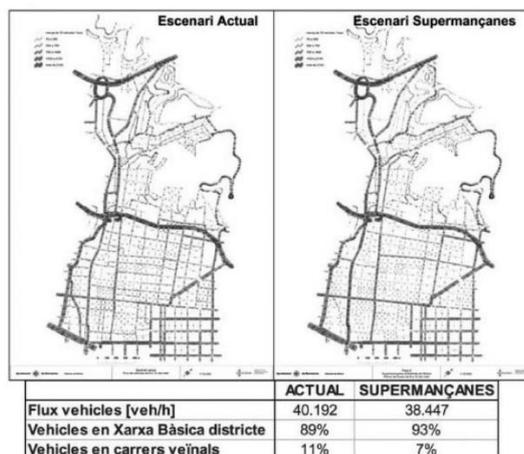


Figura 52. Escenario supermanzanas en Gracia. Fuente. (Magrinyà, 2003).

El Ayuntamiento de Barcelona continúa trabajando en el modelo de supermanzanas con la idea de desplegarlo a largo plazo a otros Distritos de Barcelona como los Distritos<sup>71</sup> de: Sants-Montjuïc, Eixample, Horta, les Corts, Nou Barris, Sant Andreu, Poblenou y Sarrià-Sant Gervasi. También ha propuesto varios proyectos piloto a partir del documento “Barrios inclusivos, barrios sostenibles a velocidad humana. Supermanzanas pilotos en Barcelona (2013)” para poner en marcha las pruebas en las siguientes zonas de Barcelona:

1. Supermanzana Piloto en “Les Corts”. Barrio de la Maternitat y Sant Ramón.
2. Supermanzana Piloto en la “Plaza de las Glorias”. Barrio de “La Sagrada Familia y Fort Pienc” del Distrito del Eixample y los Barrios del “Clot y el Parque de la Llacuna” en el Distrito de Sant Martí.
3. Supermanzana Piloto en Sant Martí. Barrio del “Poblenou”. Operativo desde septiembre de 2017.
4. Supermanzana Piloto al “Eixample”. Barrios de “l’Antiga y Nova Esquerra de L’Eixample”
5. Supermanzana Piloto en Sants Montjuïc. Barrios de “Sants y Hostafrancs”.

En la siguiente figura podemos ver el ámbito de aplicación previsto por el Ayuntamiento de Barcelona para la puesta en marcha de las distintas pruebas piloto de supermanzana.

<sup>71</sup> Para más información se puede consultar la web: <http://ajuntament.barcelona.cat/superilles/es/superilla>

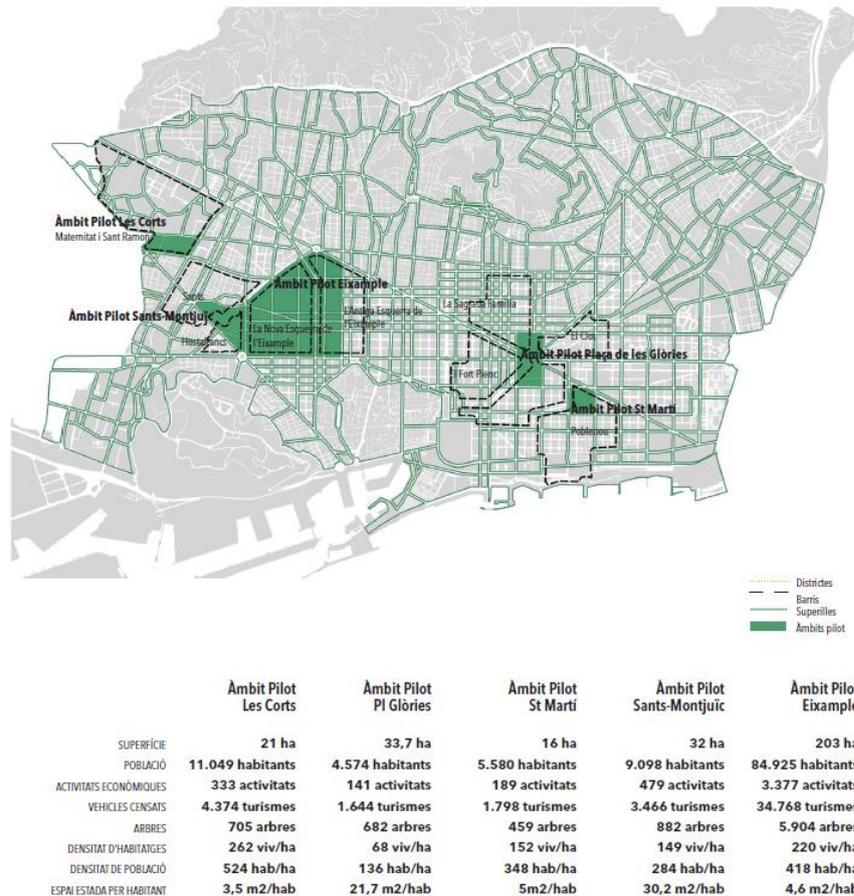


Figura 53. Ámbitos de aplicación de supermanzanas piloto en Barcelona. Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona.

### 8.3.1 Características del modelo de supermanzanas

El modelo de supermanzanas presenta una serie de características que merece la pena analizar y que seguidamente resumiremos:

#### a) Jerarquización de la red viaria

Se reorganiza funcionalmente la red en dos tipos de vías (básicas e internas de supermanzanas). La red básica (perimetral) soporta el tráfico principal y el transporte colectivo en superficie. En las vías internas se elimina el tránsito de vehículo de paso.

El espacio interior se transforma dando preferencia al peatón, pero con la presencia y coexistencia con el ciclista, vehículos de servicios, emergencias y vehículos de residentes. En el interior de la supermanzana las calles pasan a tener plataforma única y la velocidad de los vehículos más rápidos se adapta a la del peatón (10 km/h). Esta nueva situación permite aumentar sensiblemente la calidad del entorno urbano (nuevo mobiliario urbano, arbolado, ...).

b) *Integración de las redes de movilidad*

Reestructuración de la movilidad en superficie en una red diferenciada para cada modo de transporte adaptada al esquema que determinan las supermanzanas.

Esta nueva estructura apuesta por la reducción del vehículo privado y la potenciación del transporte público y los medios de transporte de corta distancia, como la bicicleta y los desplazamientos a pie. Este hecho combinado con la reducción de la oferta vial y de aparcamiento prevé facilitar el trasvase de viajes del vehículo privado hacia modos de transporte más sostenibles.

c) *Aparcamiento*

Para disponer de más espacio público para el peatón, el aparcamiento de vehículos en superficie se va eliminando gradualmente mediante la reducción del parque de automóviles (“segundos vehículos”) y la construcción de aparcamiento fuera de la calzada, si fuera necesario. Estos aparcamientos deberán ser preferiblemente accesibles desde la red básica de circulación para que el movimiento de vehículos por las calles interiores de las supermanzanas sea mínimo. Dado el tamaño de las supermanzanas (típicamente 450 metros de lado), el tiempo a pie desde los aparcamientos hasta a cualquier punto de la supermanzana es perfectamente asumible. Además, este tiempo se equiparará al de acceso al transporte colectivo, que debe mantener unos tiempos de acceso que no difieran mucho de los actuales.

d) *Accesibilidad local*

Las restricciones al tránsito de paso y las mejoras en el diseño de calles con plataforma única hacen que se mejore la accesibilidad de residentes y visitantes (con especial atención a las personas con movilidad reducida, cochecitos de niños, ancianos o niños), pero también de bicicletas, taxis y vehículos de servicios y emergencias.

e) *Reorganización de la distribución urbana*

Con el esquema de supermanzanas se dispone de más espacio público antes dedicado al vehículo privado, pero, como se ha dicho, no pueden olvidarse las necesidades de acceso de los residentes y de los vehículos de servicios entre los que hay que considerar los de distribución de última milla. El paso de éstos se puede, sin embargo, restringir regulando los horarios de las actividades logísticas urbanas, incluso controlando el acceso mediante pilones retráctiles. La distribución final se haría preferiblemente en horario nocturno (u horario de menor utilización del espacio público por parte del peatón) y por unidades de transporte silenciosas y no contaminantes. Por otra parte, se podrían construir pequeños centros logísticos en el subsuelo para reducir progresivamente la carga y descarga en superficie.

f) *Nuevo diseño del espacio público*

El espacio ganado con el nuevo diseño, que representa el 70% del ahora ocupado por el vehículo privado, queda disponible para diferentes usos y funciones de la vida cotidiana: estancia, ocio, fiestas populares, etc. Con ello se reduce la contaminación atmosférica y el ruido y se posibilita la introducción de nuevos conceptos en el diseño urbano orientados a mejorar el confort de los residentes y visitantes: corredores verdes, nuevos microclimas, ...

g) *El nuevo diseño de movilidad*

El nuevo diseño define como red básica de circulación vehicular, la que rodea las supermanzanas, o sea las células de ciudad de, como máximo, 450 metros de lado. Estas células representan para los vehículos unas condiciones circulatorias similares a las que tiene el peatón en los 110 metros de manzana de Cerdà, tanto en cuestión de tiempo de recorrido (unos dos minutos), como en oportunidad de cambiar la ruta, o hacer recorridos sin demasiadas interrupciones.

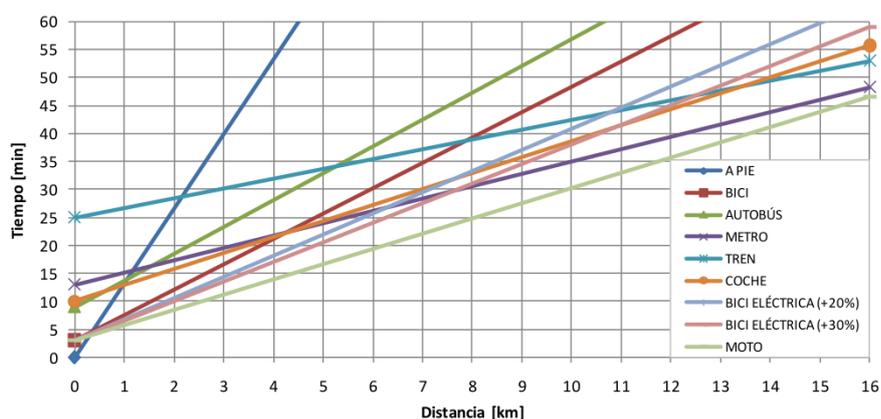


Figura 54. Relación de tiempo-distancia para los diferentes modos de transporte. Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona.

La nueva célula urbana “supermanzana”, equivalente en líneas generales a nueve manzanas del actual Ensanche de Barcelona, se define por una red de vías básicas que conectan los orígenes y destinos de toda la ciudad. La supermanzana no se atraviesa, lo que supone que los movimientos en el interior sólo tienen sentido si su origen o destino está en las “intervías”<sup>72</sup>, provocando que las calles sean vecinales sin ruido ni contaminación y liberando más del 70% del espacio, ocupado actualmente por la motorización de paso, para los movimientos a pie y en bicicleta.

<sup>72</sup> Concepto aportado por Ildefons Cerdà en su Plan Cerdà para Barcelona. El plan aportó la clasificación primaria del territorio: las «vías» y los espacios «intervías». Las primeras constituyen el espacio público de la movilidad, del encuentro, del soporte a las redes de servicios (agua, saneamiento, gas...), el arbolado (más de 100.000 árboles en la calle), el alumbrado y el mobiliario urbano. Las «intervías» (isla, manzana, bloque o cuadra) son los espacios de la vida privada, donde los edificios plurifamiliares se reúnen en dos hileras en torno a un patio interior a través del cual todas las viviendas (sin excepción) reciben el sol, la luz natural, la ventilación y la *joie de vivre*, como pedían los movimientos higienistas.

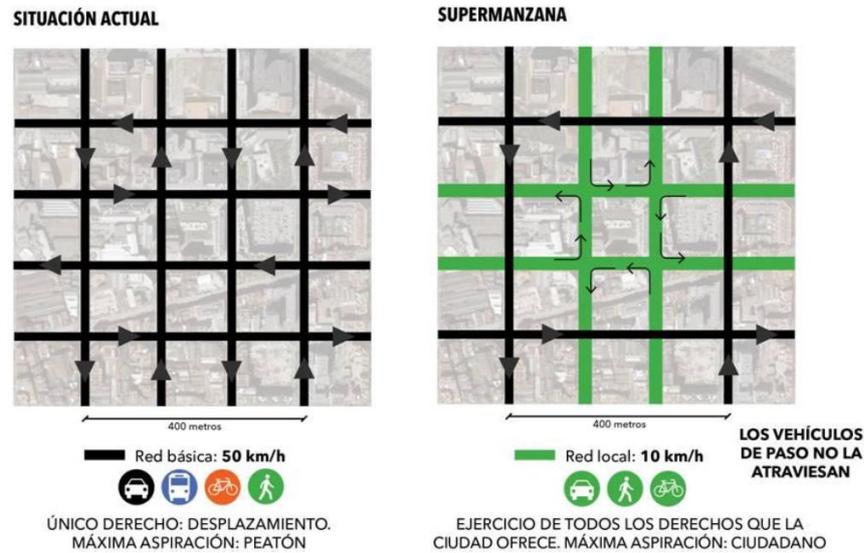


Figura 55. Jerarquía viaria en el modelo de supermanzana. Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona.

### 8.3.2 El modelo de supermanzana y su aplicación en Barcelona

En una ciudad como Barcelona, con una escasez tan elevada de espacios libres, la supermanzana permitiría liberar una gran cantidad de espacio público en la ciudad, que podría restablecer parte del espacio verde que tanta falta le hace. Las vías definidoras de las supermanzanas, cuando se conectaran entre sí, darían lugar a la red de vías básicas por donde circularían las redes de transporte urbano: transporte colectivo, vehículo privado, emergencias, servicios y, si la sección lo permitiera, la red de bicicletas. Esta red de vías básicas, que busca la máxima ortogonalidad, permitiría el acceso a la ciudad a la mayor velocidad admisible de 50 km/h (Rueda, 2016).

Con esta nueva configuración, la red básica de las supermanzanas podría reducir un 61% la longitud total de vías destinadas hoy, en Barcelona, al tráfico vehicular. Este nuevo diseño vial, según estudios de la Agencia de Ecología Urbana de Barcelona, conseguiría una reducción de vehículos privados del 13% manteniendo un nivel de servicio similar al actual. Se mantendría, por tanto, la funcionalidad y la organización del sistema actual y se liberaría, como se ha dicho, casi un 70 % del espacio dedicado, hoy, a la movilidad.

En la siguiente figura podemos ver, a la izquierda, el espacio público actual dedicado al tráfico rodado en Barcelona, que representa cerca de 15 millones de metros cuadrados con una longitud que alcanza los 912 km; y a la derecha el escenario futuro, con el modelo de supermanzanas, que conseguiría reducir un 45% la superficie destinada al vehículo. De esta forma se podría recuperar la calle para los ciudadanos, fomentar una movilidad más sostenible y reducir la contaminación y el ruido.

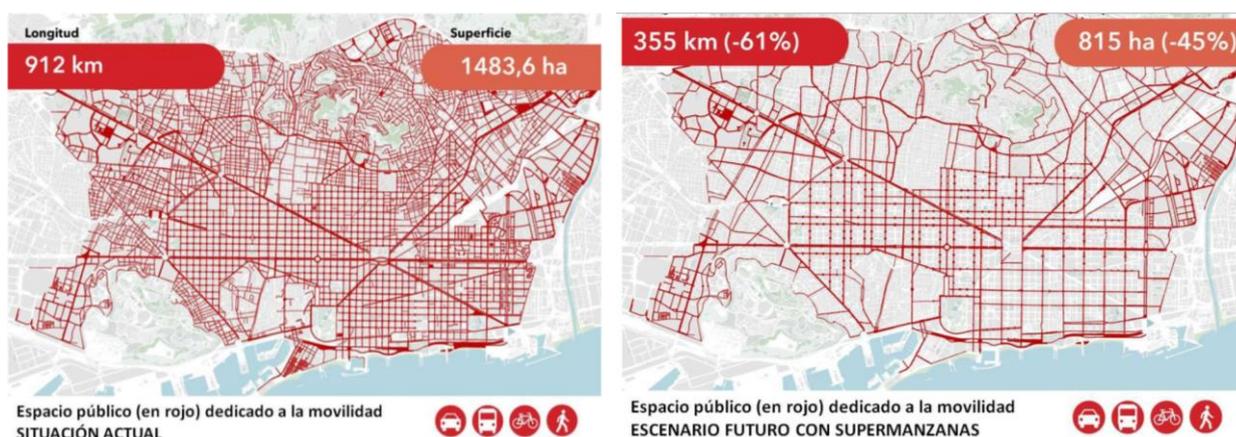


Figura 56. A la izq. red viaria actual de Barcelona a la derecha escenario futuro con supermanzanas. Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona.

A pesar de las bondades que parece tener este nuevo concepto urbanístico, pocas son las zonas de Barcelona donde se ha implementado. La primera supermanzana fue implantada en el barrio de la Ribera (el Born/Santa María del Mar) en el año 1993. Después de un primer rechazo por parte de los vecinos y comerciantes es hoy una de las áreas de la ciudad con mayor atractivo. A principios de los 90 el barrio era una zona deprimida económicamente, con ciertos rincones no recomendables por la noche. La mejora de la calidad urbana ha sido palpable y su atractivo ha provocado ciertas disfunciones por la gentrificación de una parte de la supermanzana y por la sustitución de parte de las actividades de proximidad por otras más turísticas.

Más tarde, en el año 2006, se implantaron con cierto éxito, dos nuevas supermanzanas en el barrio de Gracia. Gracia es el distrito más pequeño de Barcelona, con una extensión de 4,19 km<sup>2</sup>, aunque es el segundo con mayor densidad demográfica (28.660 habitantes por kilómetro cuadrado), al contar con una población de 120.087 habitantes. A estas características se sumaban una presencia masiva de vehículos privados, lo que suponía un déficit en el espacio disponible para el peatón. El proyecto de supermanzana en este barrio se centró en devolver la ciudad al ciudadano, superando la actual dicotomía conductor/peatón. Para ello se incrementó el espacio del peatón, restringiendo el acceso de vehículos privados, implantando zonas multifuncionales y planificando aparcamientos colectivos para automóviles, motocicletas y bicicletas. Así se consiguió un espacio público confortable que fomenta la cohesión social, garantizando la movilidad y la accesibilidad y reduciendo los impactos medioambientales.

Las supermanzanas en Gracia se definieron a través de la malla de vías básicas en cuyo interior, siguiendo los principios del modelo, se prohíbe la circulación. Su implantación en el distrito supuso un proceso amplio de participación y se diseñó un plan de comunicación destinado a toda la ciudadanía afectada. La supermanzana permitió integrar todas las intervenciones de forma coherente y funcional, incrementándose las plazas de aparcamiento y reorganizando la carga y descarga. El transporte público aumentó su oferta y las bicicletas dispusieron de una red propia. En cuanto al espacio público, se invirtió el dominio del vehículo

privado a favor del peatón. La superficie de espacios verdes y de estancia se duplicó mejorando la habitabilidad del barrio.

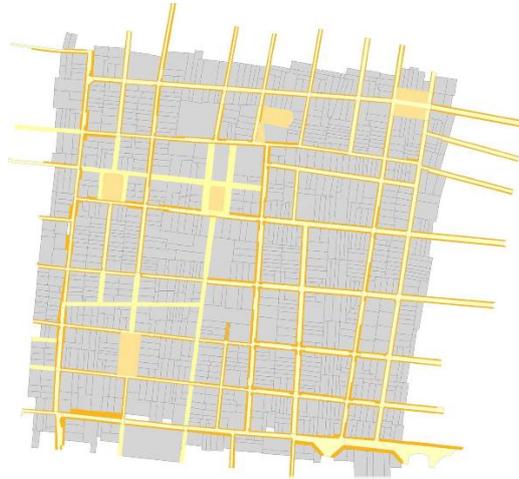


Figura 57. Supermanzanas en el Barrio de Gracia de Barcelona. Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona.

En cuanto a los resultados obtenidos en la movilidad del barrio, hay que decir que fueron satisfactorios. El tránsito vehicular se redujo de 95.889 a 81.514 viajes anuales. Los peatones aumentaron un 10% el número de viajes anuales hasta los 201.843 viajes. Por su parte, los ciclistas pasaron a realizar 10.143 viajes anuales, lo que representó un aumento del 30 por ciento (Hu, 2006).

Las características urbanas específicas del barrio de Gracia hicieron que el modelo de supermanzanas se aplicará allí con éxito, sin embargo, tuvieron que pasar 10 años hasta que se replicara el modelo en otro barrio de la ciudad. En este caso fue el barrio de Poblenou, en tejido Eixample, donde se realizó una prueba piloto de supermanzana entre las calles Tànger, Pallars, Badajoz y Llacuna, en una zona de poca densidad (1500 vecinos), que debía servir para allanar el camino a las próximas «supermanzanas» de la trama Cerdà.



Figura 58. Prueba piloto de supermanzana en el barrio de Poblenou de Barcelona. Fuente: Ajuntament de Barcelona.

El objetivo final que perseguía el Ayuntamiento de Barcelona con esta nueva actuación se muestra en la Figura 59, donde podemos apreciar cómo, con la implantación definitiva de las supermanzanas, aumentaría significativamente la superficie de espacio público, así como las áreas verdes en la zona.



**Figura 59. Objetivo final de implantación de supermanzanas en el barrio de Poble Nou. Fuente: Ajuntament de Barcelona.**

A pesar de los beneficios que prometía la nueva supermanzana en Poble Nou, los resultados de su prueba piloto no fueron los esperados y el Ayuntamiento se encontró con una fuerte oposición vecinal que con los años se ha ido desinflando.

### **8.3.3 ¿Es extrapolable el modelo de supermanzana de Gracia al resto de Barcelona?**

Las características urbanas específicas del barrio de Gracia hicieron que el modelo de supermanzanas se aplicara allí con éxito. Sin embargo, ¿es extrapolable el modelo de Gracia al resto de barrios de Barcelona?

Como ya se ha comentado, el 5 de septiembre de 2016 entró en funcionamiento la primera prueba piloto de supermanzana, en trama Eixample, en el barrio de Poble Nou dentro del Distrito de Sant Martí. La nueva configuración obligaba a los vehículos privados a girar en todas las intersecciones interiores, para impedir que pudieran circular, con el objetivo de disminuir la presencia del tráfico de paso dentro del perímetro de la supermanzana. Los vehículos que entraban en el espacio delimitado por la supermanzana no podían circular a más de 10 kilómetros por hora. El Ayuntamiento, por ello, recomendó no circular por esa zona si no era “estrictamente” necesario. Los vecinos de la zona, sin embargo, podían acceder a sus garajes y aparcamientos ateniendo a los nuevos itinerarios indicados.

El transporte público también se vio afectado por la supermanzana. Se anularon las paradas de bus de las líneas 6,40, 42 y H14, situadas en Almogàvers-Ciutat de Granada y Llacuna-Pallars, que se reubicaron en las calles que rodeaban el perímetro afectado por la nueva celda urbana. Las nuevas paradas en el exterior se situaron en Àvila/Tànger (líneas 40,42, B20, B25 y N11), Pujades/Llacuna (líneas H14 y 6) y Pujades/Badajoz (líneas H14 y 6). El resto del transporte público no cambió.

En teoría con todos estos cambios el ganador sería el peatón y la bicicleta, que verían incrementada su superficie de actuación, puesto que las intersecciones interiores a la supermanzana serían ocupadas por parques y plazas públicas. La nueva reordenación viaria creaba en los cruces centrales de la ‘supermanzana’ cuatro nuevas plazas públicas, de 2.000 metros cuadrados, con nuevos usos. Así, el cruce entre las calles Ciutat de Granada/Sancho de Àvila se destinaba al área de “estancia e intercambio”, con elementos que proporcionaban sombra y facilitaban permanecer en el espacio. El cruce de Roc Boronat/Sancho de Àvila se dedicaba a la cultura, con un espacio de cesión e intercambio de libros para favorecer el interés cultural. El deporte, tanto colectivo como individual, estaría presente en el cruce Roc Boronat/Almogàvers. Por último, el cruce de Ciutat de Granada/Almogàvers se destinaba a la participación y la expresión ciudadana.

Con todos estos cambios, no tardaron en llegar las críticas vecinales tras el funcionamiento de la prueba piloto. Los vecinos alegaban que la nueva supermanzana no había resuelto ninguno de los problemas que el Ayuntamiento dijo solucionaría. Además, indicaban que había provocado una serie de incomodidades y el empeoramiento de la calidad de vida. También la bajada de negocio en muchos comercios ubicados dentro de la supermanzana.

Durante todo el proceso de negociación vecinal, el Ayuntamiento siempre había transmitido a sus vecinos que el principal objetivo de la supermanzana era reducir la contaminación. La contaminación global, según los vecinos, no sólo no se redujo, sino que se incrementó. Los vecinos alegaban que lo que se había conseguido era centrifugar la poca circulación de las calles interiores de las supermanzanas hacia las vías básicas. Por otro lado, indicaron que los trayectos en vehículo privado dentro de la zona eran más largos, debido a las restricciones circulatorias. Otro aspecto que planteaban era que la medida había hecho aumentar el precio de la vivienda en la zona.

¿Por qué si el modelo de supermanzana había funcionado bien en el barrio de Gracia parecía no funcionar igual en el barrio de Poble Nou?

Si analizamos la trama urbana del barrio de Gràcia y del barrio de Poble Nou observamos que son muy diferentes. El barrio de Gràcia tiene un denso trazado de calles estrechas, que presentan frecuentes irregularidades, dentro de una trama que trata de mantener la ortogonalidad con manzanas generalmente de pequeñas dimensiones, edificaciones con cinco o seis alturas que dan lugar a calles de escasa iluminación y pocas zonas verdes. La tipología edificatoria mayoritaria son edificios residenciales, de finales del siglo XIX o principios del XX, conformando un paisaje urbano con mucha identidad.

Por el contrario, el barrio de San Martí es un barrio residencial, que mantiene la estructura del ensanche de Cerdà con una trama ortogonal siguiendo la dirección de la Gran Vía de las Cortes Catalanas. Existe una jerarquía de viario donde la Rambla de Guipúzcoa actúa como eje estructurante del barrio, porque conecta con el resto de la ciudad y porque cuenta con varios carriles para la circulación además de un bulevar

equipado con carril bici. La tipología edificatoria es de “bloque abierto”<sup>73</sup> de manera que gran parte de la superficie de las manzanas se libera para albergar equipamientos y zonas verdes.

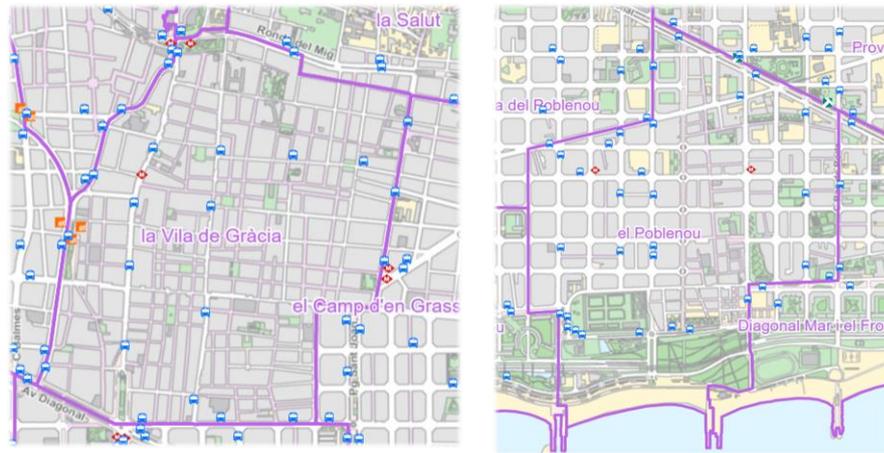


Figura 60. Trama urbana del Barrio de Gracia (izquierda). Trama urbana del Barrio Poble Nou (derecha).

Estas diferencias urbanísticas, entre los diferentes barrios de Barcelona, hacen que el modelo urbanístico de las supermanzanas se debe ir adaptando a las diferentes realidades de la ciudad, implementando en cada caso las medidas necesarias para su correcta funcionalidad. El barrio de Poble Nou ha sido un ejemplo de esta adaptación que, gracias a la participación ciudadana, ha logrado reconducir la situación de rechazo inicial a las supermanzanas.

<sup>73</sup> Forma de organización de la vivienda en la ciudad que surge en el primer tercio del siglo XX. Consiste en la construcción de «polígonos» residenciales periféricos compuestos por grandes «supermanzanas» (de varias hectáreas de superficie), en las que se disponen, con mejor o peor fortuna, distintos tipos de bloques exentos que conformarán extensos espacios interbloque, teóricamente verdes.

## **9. UN NUEVO CONCEPTO DE PEAJE URBANO: UNA RED VIAL SEGREGADA Y TARIFICADA EN FUNCIÓN DEL NIVEL DE CALIDAD**

### **9.1 Razones para la aplicación de un peaje urbano**

Hemos visto que una de las principales fuentes de emisión de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y de material particulado (PM) es el transporte rodado, especialmente los vehículos diésel. Según datos de la Unión Europea, se calcula que un 40% del NO<sub>2</sub> emitido en Europa procede de coches, camiones y motos; de este total el 80% lo generan los motores diésel. La Agencia Europea del Medio Ambiente informó que en la Unión Europea el exceso de concentraciones de PM<sub>2,5</sub> y de NO<sub>2</sub> en el año 2015 fueron las responsables de una cifra estimada de 391.000 y 17.700 muertes prematuras, respectivamente. Además, la mala calidad del aire también tiene repercusiones económicas importantes, ya que incrementa los gastos médicos, reduce la productividad laboral y daña el suelo, los cultivos, los bosques, los lagos y los ríos. La Comisión Europea ya ha puesto de manifiesto la mala calidad del aire en grandes ciudades europeas como Alemania, Francia, Reino Unido, Italia y España, ya que existen millones de ciudadanos europeos que sufren trastornos respiratorios y cardiovasculares a causa de la pobre calidad del aire urbano, que cada año acorta la vida a unas 400.000 personas. Por ello, a través de sus directivas, propone que se adopten medidas para reducir el volumen global de tráfico y potenciar el transporte público y los vehículos no contaminantes. En Europa, para cumplir con la Directiva Europea de Calidad del Aire y evitar sanciones, ya hemos evidenciado que cada vez más ciudades deben recurrir a implementar algún tipo de sistema de peaje urbano como herramienta para reducir la congestión, mejorar la calidad ambiental de sus centros urbanos y ayudar a mejorar la salud de sus residentes. La experiencia de ciudades como Londres o Estocolmo nos indica que la medida aborda con éxito estos problemas.

Las externalidades además de provocar problemas de salud generan también problemas económicos y de sostenibilidad ambiental, tanto es así que desde la Unión Europea se insiste en la necesidad de internalizar las externalidades (Libro Blanco del Transporte, 2001). (Robusté, 2002) indica que para el caso concreto del área metropolitana de Barcelona esta internalización significaría un coste adicional de 3,19 céntimos de Euro por viajero-km a los impuestos actuales de 8,23 céntimos de Euro por viajero-km. En la Figura 61 podemos ver gráficamente el desglose de costes sociales para el vehículo privado, donde puede apreciarse que las externalidades (costes y efectos no internalizados por sus usuarios) adquieren una relevancia no despreciable que, como es de esperar, aumenta en función del tráfico.

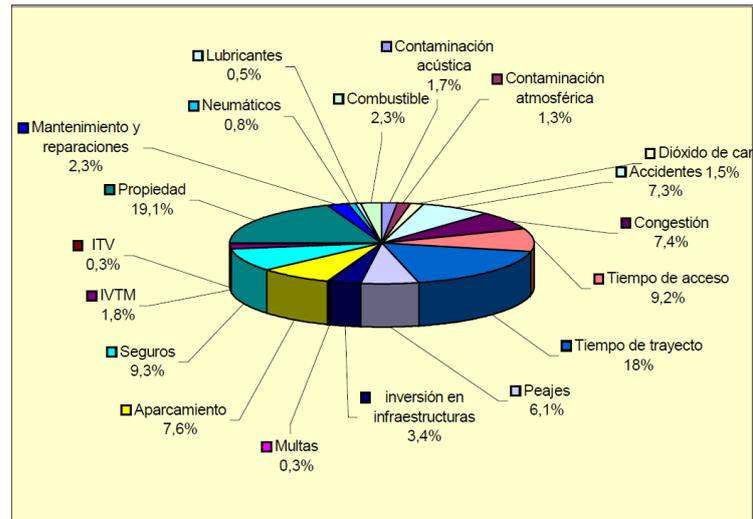


Figura 61. Desglose de los costes sociales (sin impuestos) del vehículo privado. Fuente: (Robusté, 2000).

Por otro lado, en otro estudio, (Robuste, 2001) concluye que el transporte público es 1/3 más económico para la sociedad por viajero-km transportado: 0,77 Euro/v-km en vehículo privado contra 0,51 Euro/v-km en transporte público. No obstante, desde el punto de vista económico, parece evidente apostar por medidas, como la del peaje urbano, que penalizan el uso del vehículo privado y ayudan a transferir viajes hacia el transporte público.

Del total de los costes sociales, algunos son percibidos directamente por el usuario, pero otros no. Estos costes sociales que pasan desapercibidos por los usuarios son los que serían susceptibles de ser internalizados mediante la aplicación de tasas que podrían ligarse al tiempo de trayecto, tiempo de acceso, congestión, accidentes, contaminación atmosférica o acústica. Podemos decir que la sociedad paga una parte de esos costes mediante impuestos, pero esta cantidad es inferior a los costes que genera. La diferencia entre los costes generados y los impuestos revertidos corresponde al valor de las externalidades pendientes de ser internalizadas. Por lo que, se puede concluir que la solución socialmente más justa es internalizar estos costes, a través de una tasa urbana de peaje, para que pague más aquel que más externalidades produce.

En esta línea hemos podido comprobar, a través de la experiencia internacional, que los peajes urbanos no sólo pueden ayudar a reducir la contaminación en ciudades, al reducir la congestión, sino que pueden ser uno de los mejores instrumentos para internalizar los costes derivados de las externalidades producidas por el tráfico, ayudando a mejorar el excedente social. (Santos, 2003) concluyó, después de simular varios cordones de peaje en ocho ciudades inglesas, que la introducción de un peaje urbano puede mejorar el bienestar social siempre que el peaje no sea demasiado alto. Todo esto hace que debamos plantearnos cada vez más implantar en nuestras ciudades sistemas de peajes urbanos que ayuden no sólo a hacer más justo el uso del espacio vial público, haciendo pagar a aquel que más usa y contamina, sino a mejorar la calidad ambiental con la posibilidad de revertir los ingresos generados por el sistema en mejorar el sistema de transporte público y sus infraestructuras.

## 9.2 Funcionamiento del nuevo concepto de peaje urbano

Actualmente, la mayoría de las ciudades que han implementado sistemas de peaje urbano han diseñado esquemas tarifarios tipo cordón. En el diseño de un peaje urbano tipo cordón se define un área dentro la ciudad, donde se aplica una tarifa plana a todos los vehículos que intentan entrar o salir de la misma. La tarifa fijada, en general, no depende del tiempo de circulación, tampoco de la distancia que recorre el vehículo dentro del área, ni de los niveles de congestión o contaminación generados por los vehículos. El control de estos accesos se realiza mediante cámaras de lectura de matrícula ubicadas en los puntos de entrada/salida del área delimitada. La configuración del esquema tarifario tipo cordón se aplica, en general, cuando el objetivo principal es gestionar el tráfico que entra o sale de la zona delimitada por el cordón. (Salas Rondon, 2009) indica que este tipo de esquema tiene el inconveniente de que intercepta pocos viajes y excluye a viajeros que contribuyen a la congestión, ya que impone la misma tarifa en todos los desplazamientos, restringiendo los trayectos cortos y subvalorando los largos. Además, este tipo de esquemas permite que muchos viajeros escapen de la tarifa, al reubicarse alrededor del cordón, agravándose la congestión sobre los trayectos orbitales. Esta situación se ve agravada cuando viajeros que viajan desde el interior hacia el exterior del cordón lo cruzan sin pagar tarifas durante las horas congestionadas, para solucionar este problema se suelen implementar cordones bidireccionales. (Santos, 2003) simuló cordones dobles en siete ciudades inglesas llegando a la conclusión de que un doble cordón (un cordón exterior unido a un cordón interior) permitía incrementar el bienestar social mucho más que un cordón simple.

Una variante del sistema tarifario “tipo cordón” sería la tarificación dentro de un área, conocida en inglés como (*Area licensing*). La primera ciudad en aplicarlo fue Singapur. Este tipo de tarificación consiste en cobrar una tarifa por usar la red vial dentro de un área urbana y dentro del periodo de asignación de la tarifa. El precio del viaje puede variar según la hora del día en que se realice (hora punta o valle). Con esta estructura se comienza a tarificar cuando los vehículos entran dentro del área de permiso. La desventaja de este esquema es que el pago no depende de la cantidad de viajes (tiempo o distancia) realizados dentro del área, por lo que no paga más aquel que más uso hace del viario. Dicho esquema tarifario es inequitativo y al igual que el esquema tipo cordón, imponen la misma tarifa tanto a los viajes largos como a los cortos pudiendo contribuir a la formación de congestión en las rutas fronterizas inmediatamente fuera del cordón, (A. D. May & Milne, 2000).

Por todo ello, vistos los inconvenientes de los esquemas tarifarios más comúnmente utilizados en los peajes urbanos, el presente trabajo pretende plantear un nuevo esquema tarifario más equitativo con tarifas basadas en la distancia que permitan mejorar la aplicación del peaje urbano desde el punto de vista de la equidad. Las tarifas basadas en la distancia no son nuevas y han sido ya investigadas por algunos autores. (Smith et al., 1994), analizaron los efectos de aplicar este tipo de esquema tarifario en Cambridge donde aplicaban una penalización en peniques por kilómetro recorrido al coste generalizado por atravesar cada carretera

dentro de la ciudad. (A. D. May & Milne, 2000) también analizaron los efectos de este esquema de tarificación continua por distancia recorrida en la ciudad de Cambridge.

No obstante, la nueva propuesta que aquí se plantea no sólo pretende incidir en el tipo de esquema tarifario, sino que además pretende actuar sobre la jerarquía viaria urbana, reestructurándola y ligándola a un servicio. De esta forma se plantea segregar la red urbana en dos redes, una básica de pago con un mejor servicio y otra secundaria gratuita con una velocidad de circulación muy limitada. Esta nueva filosofía de peaje urbano, de la cual no hemos encontrado literatura que haya planteado un diseño igual, se representa en la Figura 62. En esta figura podemos ver, en azul, la red básica de pago que gozaría de mayores privilegios respecto a su variante gratuita como: mayor velocidad de circulación y coordinación semafórica preferente con ondas verdes; y, en verde, la red secundaria gratuita, que tendría una velocidad de circulación muy restringida con una regulación semafórica de ámbito local. De esta forma, en este nuevo esquema viario la red básica urbana de la ciudad se presentaría como un servicio diferencial de calidad con respecto a su alternativa gratuita.

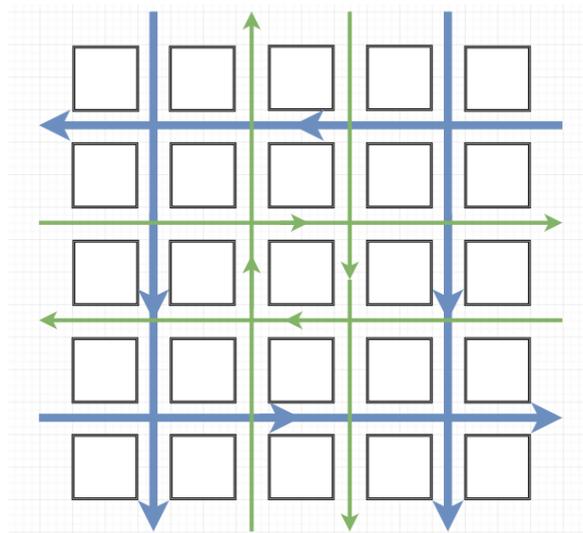


Figura 62. Jerarquía vial del nuevo modelo de peaje urbano. En color azul la red básica de pago. En color verde la red secundaria gratuita. Fuente: Elaboración propia.

El pago del peaje como precio por un servicio “*service pricing*” fue ya propuesto por (Robuste, 2003) para el caso de peajes interurbanos, donde se presenta al usuario del peaje como comprador de un servicio de calidad. En este caso el concesionario de la autopista debe considerarse como un operador de transporte que presenta unos servicios de cierta calidad, diferenciados y superiores, a los que ofrecen otras vías alternativas gratuitas. Esta idea rompe con la actual visión de mecanismo financiero que tiene la sociedad sobre los peajes, puesto que dos rutas hacia un mismo destino podrían estar o no tarificadas en función del servicio que ofrecieran a sus usuarios. *Consecuentemente, si los peajes se basan en el nivel de calidad que ofrece la vía en comparación con su alternativa libre de coste, la aceptación social crecerá.* En nuestro nuevo modelo se pretende transferir este concepto de “*service pricing*” desde el ámbito interurbano hacia

el ámbito urbano, de tal manera que estos servicios diferenciales y superiores estarían dentro del entramado vial urbano.

A nivel funcional, el nuevo modelo de peaje urbano no llevaría implícito un esquema tarifario discreto, por punto de entrada o salida, sino que, con la ayuda de las nuevas tecnologías, sería continuo basado en la distancia recorrida. Para ponerlo en práctica sería necesario que cada vehículo tuviera instalado un transpondedor con comunicaciones móviles y GPS, que permitiría almacenar en cada viaje como mínimo la siguiente información: hora y fecha de inicio-fin de viaje, duración, distancia recorrida y coste del viaje. Además, con un equipamiento adicional, nos permitiría ligar la tarifa al nivel de contaminación generado por cada vehículo. Estos dispositivos representarían un coste importante a nivel de inversión del proyecto, no obstante, durante los últimos años el avance tecnológico ha hecho reducir significativamente el precio de esta tecnología.

El nuevo sistema de peaje urbano ayudaría no sólo a reducir la congestión, mejorar la calidad ambiental urbana y estimular la demanda de transporte público, sino que además permitiría que cada vehículo pagara una tarifa más justa, en línea con los principios tarifarios de la Unión Europea “el que usa y contamina paga”. Aunque es cierto, que este sistema podría promover el uso de vías gratuitas de mayor longitud, sobre todo si las tarifas no son muy altas, el previsible incremento de la congestión en esas vías, sobre todo inmediatamente a la aplicación de la medida, ligado a actuaciones complementarias dirigidas a reducir la capacidad en la red secundaria o incluso cambiando el sentido de ciertas calles, haría que cada vez más viajeros se replantearan transferir sus viajes desde el vehículo privado hacia el transporte público, llegando hasta una nueva situación de equilibrio de red más descongestionada.

## 10. SISTEMA TECNOLÓGICO DEL NUEVO MODELO DE PEAJE URBANO DENTRO DE LA “CIUDAD INTELIGENTE”

### 10.1 Iniciativa europea de «Smart City»

El término «Smart City»<sup>74</sup> o ciudad inteligente es un concepto utilizado en investigaciones científicas y en marketing empresarial, siendo empleado frecuentemente tanto por organismos públicos como privados; sin embargo, todavía no se ha establecido una definición clara de este concepto (Caragliu, Bo, & Nijkamp, 2015) aunque parece que el uso común de la expresión se sustenta en tres características principales:

- a) No dañar el medio ambiente.
- b) Uso de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) como herramientas para la gestión inteligente.
- c) Desarrollo sostenible.

La iniciativa europea de «Smart Cities and Communities»<sup>75</sup> se centra en la problemática de la sostenibilidad de las ciudades actuales y, más específicamente, de los sistemas energéticos (European Innovation Partnership, 2013). En este caso, una «Smart City» se define implícitamente como una ciudad que mejora la calidad de vida y la economía local, avanzando hacia un futuro bajo en emisiones de CO<sub>2</sub>. Las inversiones en eficiencia energética y en energías renovables locales, junto a la reducción en el consumo de energía fósil y de emisiones de CO<sub>2</sub>, constituyen herramientas que ayudan a alcanzar la sostenibilidad y mejorar la calidad de vida en una ciudad. Una ciudad inteligente conlleva medidas innovadoras no sólo respecto a la gestión de la energía sino también respecto a las redes de transporte o edificios, entre otros. Esta iniciativa europea tiene por objeto apoyar a ciudades europeas, con una población mínima total de veinte millones de habitantes, a que desarrollen acciones innovadoras en eficiencia energética, uso de tecnologías de bajas emisiones, redes inteligentes de transporte y acciones de movilidad sostenible. Los objetivos iniciales<sup>76</sup> de esta iniciativa se han pre-cuantificado según los siguientes criterios:

---

<sup>74</sup> Una ciudad inteligente es una visión de desarrollo urbano para integrar de manera segura las múltiples tecnologías de la información y la comunicación (TIC) y las soluciones de Internet de las cosas (IoT) de manera segura para administrar los activos de una ciudad. Los activos de la ciudad incluyen, los sistemas de información, las escuelas, las bibliotecas, los sistemas de transporte, los hospitales, las centrales eléctricas, las redes de abastecimiento de agua, la gestión de desechos. El objetivo de construir una ciudad inteligente es mejorar la calidad de vida mediante el uso de la informática y la tecnología urbana para mejorar la eficiencia de los servicios y satisfacer las necesidades de los residentes. Las TIC permiten a los funcionarios de la ciudad interactuar directamente con la comunidad y la infraestructura de la ciudad y monitorear lo que está sucediendo en la ciudad, cómo está evolucionando la ciudad y cómo permitir una mejor calidad de vida. A través del uso de sensores integrados con sistemas de monitoreo en tiempo real, los datos son recolectados de ciudadanos y dispositivos - luego procesados y analizados. La información y el conocimiento reunidos son claves para abordar la ineficiencia

<sup>75</sup> European Innovation Partnership on Smart Cities and Communities (EIP-SCC): Iniciativa apoyada por la Comisión europea para las ciudades, industrias, bancos, investigadores, y otros actores implicados con el desarrollo de ciudades inteligentes que mejoren la calidad de vida de sus ciudadanos.

<sup>76</sup> Para ampliar información visitar la web “<https://setis.ec.europa.eu/set-plan-implementation/technology-roadmaps/european-initiative-smart-cities>”

- Reducción del 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero en 2020 (respecto a 1990), que a su vez supondrán beneficios en el ámbito medioambiental y energético.
- Implantación del concepto “Smart City” en el 5% de la población de la Unión Europea, activando el desarrollo de nuevas tecnologías no contaminantes y eficientes.
- Difusión de “mejores prácticas” de energías sostenibles implementadas a nivel local, a través de iniciativas como, por ejemplo, el Pacto de Alcaldes (Covenant of Majors)<sup>77</sup>

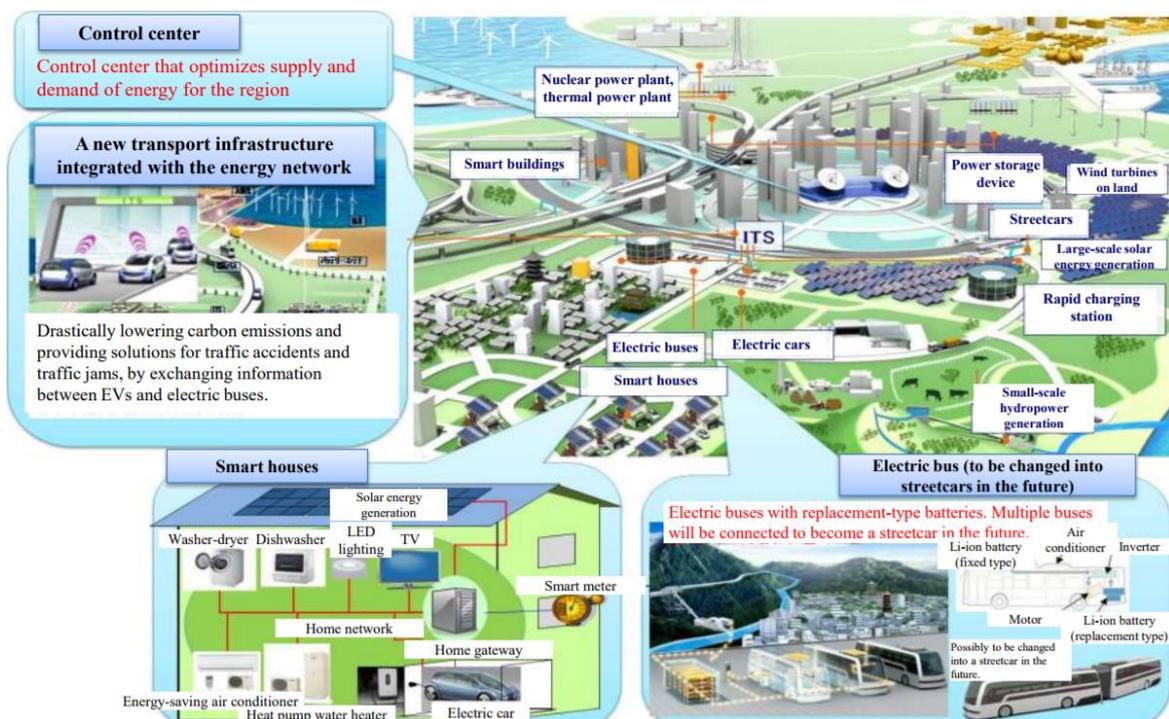


Figura 63. Concepto japonés de una ciudad inteligente. Fuente: Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón.

En el área de la movilidad este concepto se extiende al de “Smart Mobility” o movilidad inteligente y persigue los siguientes objetivos:

- Priorizar el uso del transporte público mediante el análisis de los flujos de tráfico.
- Detección automática de las infracciones del código de circulación y de sus peligros en las carreteras. Informar de estas situaciones en tiempo real a los usuarios de la vía mediante señalización de mensajería variable y mediante internet.

<sup>77</sup> El Pacto de los Alcaldes es el principal movimiento europeo en el que participan las autoridades locales y regionales que han asumido el compromiso voluntario de mejorar la eficiencia energética y utilizar fuentes de energía renovable en sus territorios. Con su compromiso, los firmantes del Pacto se han propuesto superar el objetivo de la Unión Europea de reducir en un 20 % las emisiones de CO2 antes de 2020.

- Desarrollo de modelos matemáticos y simulaciones para poder comparar distintas vías de circulación y escenarios de transporte, así como para predecir posibles efectos sociales y ambientales.
- Establecer una serie de tarifas para el transporte privado ligadas al impacto ambiental generado y al uso de las infraestructuras.
- Implantar servicios de información “online” sobre la movilidad para los ciudadanos, a través de teléfonos inteligente, dispositivos móviles o pantallas fijas que informen de conexiones o tiempos estimados de llegada tanto del transporte público, como de servicios para compartir bicicletas o vehículos compartidos, entre otros.
- Impulsar el desarrollo de medios de transporte más sostenibles y menos contaminantes como: vehículos eléctricos, medios de transporte impulsados por hidrógeno, tranvías interurbanos, combustibles renovables, etc.

Dentro de la movilidad inteligente de una ciudad el vehículo juega un papel muy importante y el futuro es su total conexión con la ciudad y su entorno. Este hecho supondrá que, con la ayuda de sensores, la ciudad disponga en tiempo real de una enorme cantidad de datos de tráfico “Big Data”<sup>78</sup>, que ayudaran a tomar decisiones para influir en los patrones de movilidad y mejorar la eficiencia del sistema de transporte de la ciudad.

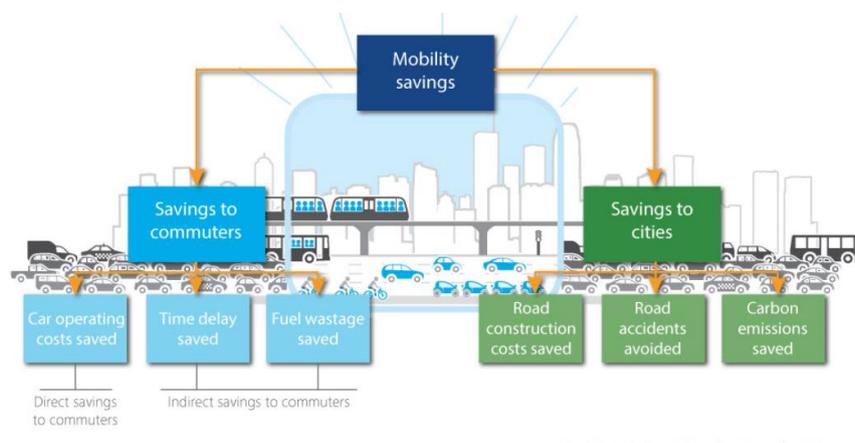


Figura 64. Ahorros de una movilidad inteligente. Fuente: (Viechnicki et al, 2015).

## 10.2 El sistema de peaje con posicionamiento satelital. Una tecnología prometedora

Los sistemas electrónicos de peaje han sido utilizados desde los años 60. William Vickrey en 1959 fue el primero en proponer un sistema electrónico de pago de peaje para el área metropolitana de Washington.

<sup>78</sup> Big data, macrodatos, datos masivos o datos a gran escala es un concepto que hace referencia a conjuntos de datos tan grandes que aplicaciones informática tradicionales del procesamiento de datos no son suficientes para tratar con ellos y a los procedimientos usados para encontrar patrones repetitivos dentro de esos datos.

Propuso que cada vehículo debería estar equipado con una unidad embarcada que emitiría una señal que sería recogida por un receptor instalado en un pórtico de la carretera. Cada vez que el vehículo pasara por debajo de ese punto, se emitiría una señal, que sería enviada a una computadora central encargada de realizar la transacción de pago.

El país pionero en implementar en sus carreteras, de una manera generalizada, sistemas de peajes electrónicos o «ETC-Electronic Toll Collection» fue Noruega. Uno de sus principales logros fue conseguir que el vehículo realizará el pago electrónico sin necesidad de que este se detuviera al pasar por el pórtico de peaje, aunque si debía reducir su velocidad de circulación. La primera ciudad nórdica en hacerlo fue Bergen, en 1986, posteriormente lo hizo Trondheim.



**Figura 65. Ejemplo de transpondedor instalado en vehículo para realizar pago electrónico de peajes.**

La evolución de la tecnología utilizada en los «ETC» ha llevado a la creación de lo que actualmente se conoce como «ORT-Open Road Tolling» o carreteras de peaje en flujo libre, donde el pago del peaje se realiza electrónicamente sin provocar impactos en el flujo de tráfico. Las dos principales tecnologías utilizadas en las “ORT” se basan en:

- a) Transpondedores dedicados a la comunicación de corto alcance (DSRC).

Estos usan tecnología de microondas de 5,8 GHz. Es la tecnología más extendida actualmente para este fin, aunque presenta ciertas desventajas como:

- El transpondedor, o unidad de abordo, no suele contar con una interfaz capaz de proporcionar información vial ni apoyo a sistemas que permitan aplicar tasas variables.
  - Escasa interoperabilidad entre diferentes sistemas, a pesar, como ya hemos visto, de los esfuerzos legislativos implementados por la Unión Europea. Esto implica que, si un usuario viaja al extranjero, probablemente deberá comprar un transpondedor diferente para realizar el pago electrónico del peaje.
- b) «GNSS-Global Navigation Satellite System» con «GSM-Global System for Mobile Communications».

Los peajes con tecnología GNSS-GSM son los más prometedores debido a su enorme flexibilidad, a pesar de ello hay muy pocos ejemplos prácticos, ninguno a nivel de peaje urbano, al tener un elevado coste de implantación. Su funcionamiento, en general, se basa en dos sistemas tecnológicos. Por un lado, un sistema de rastreo de vehículos basado en satélites, que permite determinar la ubicación exacta del vehículo y, por otro, un sistema con tecnología de comunicaciones móviles, que permite transmitir la información del viaje y realizar el pago. Para la puesta en marcha del sistema cada vehículo debería disponer de un transpondedor o unidad de abordo que registraría, mediante la descarga periódica de datos desde el satélite, los movimientos del vehículo. Los datos descargados llevarían una marca de tiempo.

Una de las tecnologías claves para este tipo de peaje GNSS-GSM es el sistema de posicionamiento satelital. A nivel europeo, se está finalizando el desarrollo del sistema Galileo, que es un sistema europeo de radionavegación y posicionamiento por satélite. El sistema Galileo ha sido desarrollado por la Unión Europea conjuntamente con la Agencia Espacial Europea. Este sistema de radionavegación dota a la Unión Europea de una tecnología independiente del GPS estadounidense y del GLONASS ruso. A diferencia de los sistemas rusos y estadounidenses, el sistema Galileo será únicamente de uso civil. Se prevé que este completado en 2020. Galileo brindará ubicación en el espacio en tiempo real con una precisión del orden de 1cm, para el sistema gratuito, y de hasta 1 cm para el de pago. Una de las grandes ventajas de este nuevo sistema es que aumenta la fiabilidad y reducción de problemas de comunicaciones, al proveer de forma independiente la transmisión de señales suplementarias de radionavegación en diferentes bandas de frecuencia

Las principales ventajas de estos sistemas de peaje GNSS-GSM respecto a los convencionales son las siguientes:

- Es un sistema más rápido, implica menos papeleo y necesita menores costes para las transacciones de pago. El conductor sólo tiene que conducir a través de las vías de peaje y un sistema automático, a través de una conexión inalámbrica, realiza la transacción de pago.
- El sistema puede proporcionar información adicional de servicios a lo largo del trayecto. Por ejemplo, el conductor podría recibir información en tiempo real del tráfico, clima, etc., además, en caso de emergencia el conductor estaría siempre localizado.
- Los costes derivados de la instalación de equipamientos en las infraestructuras de transporte son inferiores que en los sistemas de peaje convencional. Sin embargo, existe el coste producido de la necesidad de instalación del transpondedor en cada vehículo. Este último se prevé que, en el futuro, con la llegada de las comunicaciones C-V2X y el despliegue de las redes 5G, se reduzca considerablemente al ser incorporado por los fabricantes de coches.

- Es un sistema que presenta una mayor flexibilidad a la hora de implementar peajes variables. Los peajes podrían cobrarse de manera diferente según el trayecto, duración, etc.

A pesar de las grandes ventajas que ofrecen los peajes con esta tecnología todavía siguen sin abordar, convenientemente, los siguientes problemas:

- Estandarización del sistema para permitir la interoperabilidad entre los diferentes sistemas de peajes existentes. En línea a resolver esta interoperabilidad (Dias, Matos, & Oliveira, 2014) proponen un sistema de pago, compatible entre los sistemas DSRC y GNSS-GSM, a través de un software con una interface capaz de proporcionar información de precios, mejores rutas, métodos de pago, etc., que brindarían nuevas funcionalidades a los usuarios. Los pagos se realizarían a través del móvil mediante la tecnología de comunicaciones NFC<sup>79</sup> entre el móvil y la unidad de abordo (OBU).
- Resolución de los problemas de pérdida de comunicaciones en tormentas eléctricas, túneles, depresiones del terreno. En principio el nuevo sistema europeo Galileo resolvería gran parte de estos problemas.
- Dependencia, por parte de las concesionarias de peaje, de las infraestructuras de comunicaciones GSM de las operadoras móviles en el caso de que quieran implementar sistemas de peaje satelital GNSS-GSM. Esto implica resolver el problema de la gestión de los datos generados, puesto que podrían ser gestionados a través de terceros.
- A pesar de que los costes de mantenimiento del sistema no son altos, si lo es su puesta en marcha. Es necesario asumir los costes de la instalación del OBU en cada vehículo, aunque en el futuro con la tecnología C-V2X estos OBU's no serán necesarios.
- Al igual que otros sistemas de pago electrónico de peaje, el anonimato del usuario es difícil de garantizar.

Podemos considerar el peaje por satélite como la tecnología más prometedora para los futuros sistemas electrónicos de peaje porque, como ya hemos dicho, tiene una gran flexibilidad y permite implantar peajes más justos basados en la distancia, donde el usuario paga por el uso real que hace de la infraestructura, o en función del tiempo y ubicación. Es cierto que actualmente es un sistema caro, debido a la necesidad de implementar en cada vehículo un transpondedor, pero en el futuro con el despliegue de las redes 5G y el

---

<sup>79</sup> NFC: "Near Field Communication" o comunicación de campo cercano es una tecnología de comunicación inalámbrica de corto alcance y baja frecuencia que permite el intercambio de datos entre dispositivos. Los estándares de NFC cubren protocolos de comunicaciones y formatos de intercambio de datos, y están basados en ISO 14443 (RFID, "radio-frequency identification") y FeliCa.

desarrollo de las comunicaciones C-V2X los nuevos automóviles tendrán integrados equipos que permitirán estas comunicaciones, lo que reducirá sus costes de implantación.

### 10.2.1 Un ejemplo de aplicación. El peaje interurbano para camiones de Alemania.

El Gobierno Federal alemán introdujo en el año 2005 un peaje para camiones, con peso total de más de 12 toneladas, basado en la distancia. El peaje cubría más de 12.000 km de carreteras alemanas y afectaba aproximadamente a 1,4 millones de camiones. La empresa privada encargada de la recaudación del peaje, que implementó un sistema llamado “Toll Collect”, garantizaba su cobro en carretera sin necesidad de ralentizar o detener el movimiento del vehículo.

El sistema “Toll Collect” alemán necesita que el conductor disponga una unidad de abordo (OBU) con GPS y capacidad de comunicaciones GSM. Esta unidad de abordo determina automáticamente el número de kilómetros recorridos en la carretera de peaje. El sistema calcula la cantidad total a pagar y se transmite la información al centro de control de “Toll Collect”. Todos los datos del viaje son almacenados en el OBU.

Para poder usar este sistema de peaje, la empresa de transporte debe registrar inicialmente el camión en el sistema “Toll Collect”. Posteriormente se instala el OBU que dispone de los datos necesarios para realizar las transacciones de pago. Los OBU son propiedad de la empresa concesionaria y son gratuitos para los usuarios registrados. Una vez finalizado el contrato con el cliente, el OBU se debe devolver. El pago del servicio se puede realizar mediante tarjeta de crédito o débito, tarjeta de combustible o domiciliación bancaria.

El sistema cuenta con alrededor de 300 puntos automáticos de control que utilizan pórticos fijos en carretera para comprobar el pago del peaje. Los pórticos están dotados de sistemas de clasificación vehicular que realizan un escaneo del vehículo para verificar su contorno y se requiere del pago del peaje.

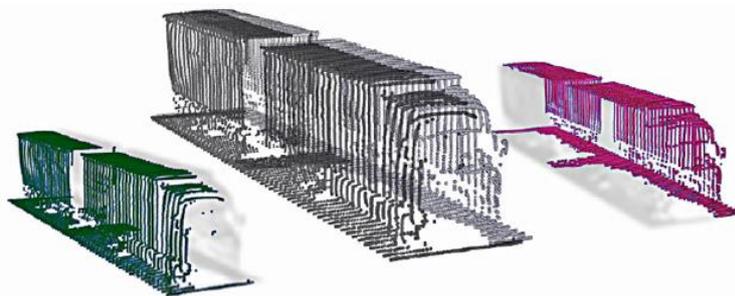


Figura 66. Cortina laser para clasificación vehicular. Fuente: (Persad et al., 2007)

En cuanto a la seguridad y protección de los datos, el gobierno alemán es el responsable del sistema y vela por su protección. Los datos se encriptan y son transmitidos a través de una cadena de seguridad de extremo a extremo evitando la manipulación de datos. Los OBU no pueden ser manipulados y no es posible acceder ni leer su información, estos disponen de sistemas que avisarían de dicha manipulación.

### 10.3 La conexión del vehículo con su entorno

El futuro es la total conexión del coche con su entorno, por ello durante los últimos años se han producido grandes avances en la estandarización de redes de comunicaciones vehiculares. Las redes de comunicaciones vehiculares son un tipo de redes de comunicaciones que utilizan a los vehículos y unidades de carreteras como nodos de la red. Son estos nodos que se comunican entre sí, proporcionándose mutuamente información de advertencias de seguridad o información de tráfico. Estas comunicaciones pueden ser muy eficaces para evitar accidentes y congestión del tráfico. Ambos tipos de nodos son dispositivos dedicados de comunicaciones de corto alcance (DSRC). En Europa, el CEN (Comité Europeo de Normalización) las ha normalizado mediante una serie de normativa, alguna de ellas ya vistas en los capítulos anteriores.

Las comunicaciones de corto alcance se suelen utilizar para el desarrollo de sistemas inteligentes de tráfico ITS<sup>80</sup>. Dado el reducido alcance del canal de comunicación (hasta 1 km.), la conectividad se establece de forma esporádica (ad-hoc). Por este motivo, estas redes se consideran un tipo específico de red móvil de comunicación MANET<sup>81</sup>. No obstante, este tipo de redes tienen una serie de retos específicos asociados, tales como la alta volatilidad de las redes, la velocidad de los nodos comunicantes y la concentración de los nodos en un área.

Las redes de comunicaciones vehiculares suelen distinguir dos entornos de comunicación:

- a) Entorno de comunicación vehicular: En este entorno se sitúan dos entidades diferentes, los vehículos y la infraestructura de comunicaciones. Los vehículos van equipados con una unidad de comunicaciones a bordo (referida habitualmente como OBU). Por su parte, la infraestructura de comunicaciones puede formarse bien a través de comunicaciones vía satélite, o bien a través de postes situados a lo largo de las carreteras (conocidos comúnmente como RSU, del inglés Road-Side Unit). Entre estas entidades se pueden producir diferentes paradigmas de comunicación, siendo los más relevantes el vehículo-a-infraestructura (conocido como V2I o V2R), el infraestructura-a-vehículo (I2V o R2V) y el vehículo-a-vehículo (V2V).
- b) Entorno de comunicación de infraestructura: En este entorno se sitúan los proveedores de servicios a los que se accede a través de esta red, así como las demás entidades de gestión auxiliares (tales como autoridades de certificación, autoridades de gestión del tráfico, etc.). Estas entidades pueden establecer conexión con los vehículos a través de la infraestructura de comunicaciones del entorno de comunicación vehicular.

---

<sup>80</sup> ITS: abreviatura en inglés de “Intelligent Transport System” o sistema inteligente de transporte.

<sup>81</sup> Las Mobile ad hoc network (denominadas también MANET como acrónimo de Mobile ad hoc network) en algunas ocasiones denominada también como malla de nodos móviles (*mobile mesh network*), se trata de una red de dispositivos conectados inalámbricamente “wireless” y que poseen propiedades de auto-configuración, además de poseer cierta movilidad (es decir se encuentran montados en plataformas móviles). Las MANETs son un tipo de wireless ad hoc networks que forman, por regla general, una malla enrutable en forma de una capa de enlace de datos

La utilidad de este tipo de redes radica en la provisión de una serie de nuevos servicios que se han denominado, de forma colectiva, Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT) o en inglés (ITS). Gracias a los SIT, los vehículos disponen de más y mejor información sobre el estado del tráfico, y pueden acceder a servicios y datos que mejoran la comodidad del viaje para los pasajeros (tales como VoIP, vídeo bajo demanda, etc.). También, es posible obtener información enriquecida de localización, con lo que los sistemas de navegación basados en GPS pueden mejorar su eficacia. De esta forma los vehículos podrían estar en todo momento conectados con su entorno. En la siguiente figura podemos ver una ilustración de lo que sería la conexión del vehículo con el entorno.



Figura 67. Conexión inteligente del automóvil con su entorno a través de comunicaciones.

Además de la mejora de la conducción y del transporte, este tipo de redes abren la puerta a novedosos mecanismos que tienen por objetivo simplificar la tarea de conducción y aumentar la seguridad vial. Así, a través de estas redes es posible que el vehículo ofrezca asistencia al conductor o que, incluso, se pueda alcanzar una conducción automática. En este sentido, una futura aplicación para implantar en estas redes será el eCall<sup>82</sup>. Con la ayuda de este programario un vehículo advertirá de la ocurrencia de un accidente y avisará a los sistemas de emergencia correspondientes.

En este nuevo contexto, podrían surgir nuevas vías de negocio para las operadoras de telefonía móvil que podrían informar en tiempo real a los conductores sobre servicios a lo largo del itinerario del viaje. Por ejemplo, un conductor que se dirigiera a un lugar determinado podría ser informado en tiempo real del parking más cercano, seguidamente realizar la reserva de la plaza y pagar el coste de estacionamiento directamente desde su móvil o dispositivo embarcado. Es decir, se abriría la puerta al pago centralizado de servicios como estacionamientos, lavado de vehículos, combustible, publicidad, ...

<sup>82</sup> eCall es un sistema de llamada de emergencia embarcado en el vehículo que es capaz de, en caso de accidente, conectarse automáticamente o mediante activación manual, a través de la red de comunicación inalámbrica móvil, con el punto de atención de llamadas de emergencia (PSAP). Este sistema ha sido desarrollado gracias a una iniciativa de la Comisión Europea y su objetivo es proporcionar ayuda rápida a los automovilistas implicados en un accidente de tráfico en cualquier parte de la Unión Europea. En abril de 2015 el Parlamento Europeo aprobó la aplicación de eCall en turismos nuevos a partir de abril de 2018. Una vez desplegado el sistema, se espera que se desarrollen otros servicios telemáticos basados en las funcionalidades de posicionamiento, capacidad de procesamiento y comunicación introducidas por la plataforma eCall, privados y públicos, tales como sugerencias de ruta e información de tráfico, telepeaje, seguimiento de mercancías peligrosas, esquemas avanzados de seguros, etc.

Toda la evolución tecnológica producida en el sector del transporte y la movilidad, durante los últimos años, hace posible la viabilidad tecnológica de nuevos sistemas que permita el pago por el uso real que se hace de la infraestructura.

### 10.3.1 Un ejemplo práctico. El proyecto “Road X” de Colorado

En marzo de 2017, la Comisión de Transporte del Estado de Colorado asignó \$ 7.5 millones al “Programa Road X” para desarrollar un marco de trabajo con el fin de plantear los requisitos técnicos de un sistema de comunicaciones en carreteras V2X que deriven en la implantación de una prueba piloto de vehículos conectados. Para ello Departamento de Transporte de Colorado (CDOT)<sup>83</sup> fijó una serie de fases del proyecto con un calendario trabajo asociado a unos presupuestos estimados que se detallan a continuación.

<b>Phase 0</b>	Project Plan & System Design • Develop Phase 0 Baseline Schedule • Define & Initiate Program Management • Complete Systems Engineering Planning	• Select Project Vendors & Partners • Build Panasonic V2X Test Environment • Develop Phase 1-5 Preliminary Schedule • Develop Phase 0 Final Report defining Phases 1-5
<b>Phase 1</b>	Vehicle-to-Infrastructure (V2I) Communications – Collect Data	
<b>Phase 2</b>	Infrastructure-to-Vehicle (I2V) Communications – Disseminate Data	
<b>Phase 3</b>	Vehicle-to-Vehicle Communications (V2V)	
<b>Phase 4</b>	Enhanced Data Analytics	
<b>Phase 5</b>	End-to-End System Deployment on I-70	

Tabla 30. Fases del programa “Road X” de Colorado. Fuente: CDOT.

Phases	Start	Finish	Funding Needed
Phase 0	Feb 2017	Aug. 2017	\$7.5M (funded)
Phase 1	Sept. 2017	Jul. 2018	\$12M
Phases 2 & 3	Aug. 2018	Jul. 2019	\$17M
Phase 4	Aug. 2019	Jul. 2020	\$17M
Phase 5	Aug. 2020	Jul. 2021	\$17M
			\$70.5M

Tabla 31. Calendario de trabajo y recursos económicos necesarios del programa “Road X”. Fuente: CDOT.

Con este proyecto el Departamento de Transporte de Colorado (CDOT), junto con su socio tecnológico (Panasonic Corporation de América del Norte)<sup>84</sup>, pretende conseguir un exitoso programa piloto con el que comenzar el despliegue en el mundo real de tecnología V2X conectando el vehículo con el medio ambiente. Esta colaboración representa la mayor inversión en la tecnología compartida V2X dentro de los Estados Unidos. Dicha iniciativa convertirá aproximadamente 18 millas de la interestatal 25 de Colorado, entre Monument y Castle Rock, en un banco de pruebas para el vehículo conectado. El tramo de carretera en

<sup>83</sup> El Departamento de Transporte de Colorado (CDOT) supervisa y mantiene en Colorado más de 23,000 millas de carreteras y 3.447 puentes. Para más información se puede visitar la web [www.codot.gov](http://www.codot.gov).

<sup>84</sup> Panasonic Corporation de América del Norte: es una filial de la corporación Panasonic, compañía multinacional con sede central en Japón que se ha convertido en una de las mayores empresas japonesas productoras de tecnología y electrónica. La compañía aprovecha sus fortalezas para aportar valor en diferentes industrias como la del entretenimiento inmersivo, las energías sostenibles, las cadenas de suministro automatizados y soluciones conectadas para proporcionar soluciones seguras y resilientes integrados para clientes B2B.

pruebas, que probablemente será ampliado con dos carriles de peaje, será el primero donde los residentes del área de Colorado Spring vean aplicada la tecnología V2X a finales del 2021.

En la primera fase, finalizada en 2018, se instalaron y probaron cinco equipos de comunicaciones terrestres con tecnología V2X junto con seis unidades embarcadas en vehículos con la misma tecnología. Para la prueba piloto se desarrolló un centro de operaciones de red capaz de gestionar el sistema en su conjunto. Los datos generados por el sistema se recopilan y almacenan en la nube para que, tanto la CDOT como Gobiernos locales, los puedan utilizar para coordinar situaciones de emergencias o gestionar el tráfico. Gracias a esta prueba piloto se ha conseguido implementar en una carretera real la tecnología V2X.

Mediante la creación de esta carretera conectada a los vehículos, tanto conductores como gestores de tráfico podrán recibir información en tiempo real sobre las condiciones de la vía (retrasos en el tráfico, condiciones de hielo, accidentes, así como una comunicación continua y automática entre los distintos vehículos y la infraestructura vial). Una vez se consiga desplegar el sistema a lo largo de todo el vial, la CDOT prevé una reducción del 81 por ciento de accidentes con múltiples vehículos. Por otro lado, el nuevo equipamiento podrá proporcionar a sus usuarios tiempos de viajes más fiable y una capacidad para que los vehículos se puedan comunicar entre sí mismos permitiendo la autoconducción de los mismos.



**Tabla 32. Equipo de comunicaciones con tecnología V2X instalado en carretera. Fuente: CDOT.**

Con este proyecto el Gobierno de Colorado de los Estados Unidos se prepara para el futuro, siguiendo la dirección de muchos fabricantes de automóviles que tratan de implementar en sus vehículos la tecnología V2X. La CDOT espera que toda la red de carreteras estatal de Colorado esté activa a finales de 2022. Para entonces, se espera que varias de las principales empresas fabricantes de automóviles hayan implementado modelos con capacidad para comunicarse con tecnología V2X.

Según el CDOT la implementación del sistema V2X en todas las carreteras de Colorado implicaría generar más de 2 mil millones de mensajes de seguridad por hora a todos los vehículos que circularan por sus vías. A modo de comparación, el número promedio de mensajes enviados por Twitter es de aproximadamente 28 millones de tweets por hora, lo que correspondería a que el sistema V2X que gestionaría el CDOT tendría 70 veces más de volumen por hora que el que procesa actualmente Twitter.

Este nuevo modelo, que permitirá conectar el vehículo con la infraestructura, generará una gran cantidad de datos, tanto por los conductores como por la infraestructura, cuya principal ventaja es aprovecharlos para tener patrones de movilidad e incluso patrones de conducción de usuarios potencialmente peligrosos. La implantación de esta tecnología también puede ayudar a reducir los impactos entre vehículos cuando estos se encuentran en un punto ciego, o cuando un vehículo frena repentinamente o incluso alertar al conductor sobre si debe frenar porque el semáforo se va a poner en rojo.

Todas las bondades que promete aportar este nuevo sistema han hecho que otros Estados de América del Norte como Wyoming o ciudades como Nueva York, Tampa o Florida estén desarrollando iniciativas similares a las de Colorado.

#### **10.4 Propuesta de arquitectura del nuevo modelo de peaje urbano**

Hemos visto que los sistemas de peaje GNSS-GSM son la mejor opción para implantar peajes basados en la distancia, puesto que nos permiten tarifificar por el uso real que el usuario hace de la infraestructura. Aunque su uso todavía no es muy común en peajes, y sólo hay unas pocas experiencias a nivel interurbano, proponemos esta tecnología, con cierta adaptación, para aplicarla en el nuevo modelo de peaje urbano planteado en esta tesis. Para poner en marcha este sistema sería necesario que todos los vehículos llevaran instalado una unidad de abordo o transpondedor, que se encargaría de almacenar y enviar el recorrido realizado durante el viaje de cada usuario. En el futuro este transpondedor debería evolucionar<sup>85</sup> y estar integrado, gracias a los fabricantes de automóviles, en todos los nuevos modelos de vehículos. Por otro lado, el nuevo sistema debería abordar el diseño de un centro de control de tráfico capaz de tratar la enorme cantidad de datos generados.

En cuanto a la arquitectura general del nuevo modelo de peaje urbano, estaría formada por diferentes subsistemas que, en líneas generales, serían los siguientes: un subsistema de seguimiento y localización de vehículos (SLV), un subsistema de vigilancia ambiental (SVA), un subsistema de control e infracción de paso (SCI) y un subsistema de cobro (SC). Estos subsistemas se integrarían dentro de una única plataforma que permitiría un control global del sistema. Todo ello se gobernaría desde un potente centro de control de tráfico. En la siguiente figura se muestra un esquema general del sistema.

---

<sup>85</sup> Siendo capaz de comunicarse mediante protocolos C-V2X con la ayuda del despliegue de las redes 5G.

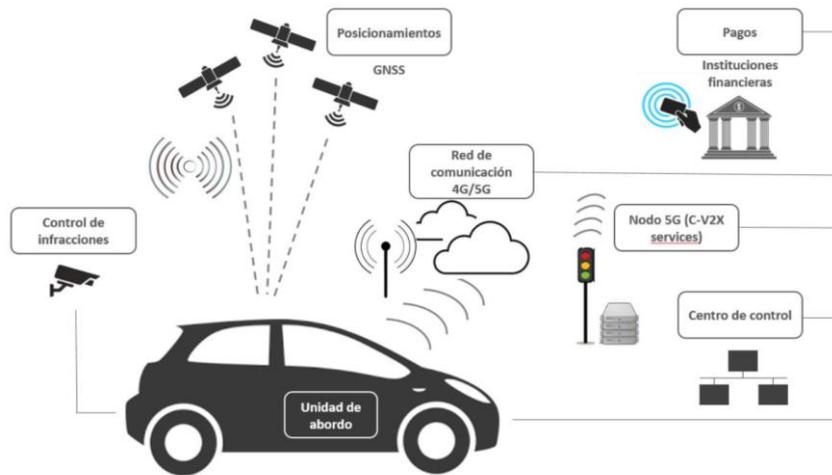


Figura 68. Esquema general del nuevo sistema de peaje urbano. Fuente: Elaboración propia.

### 10.4.1 La unidad embarcada “H-Mobility”

Para poner en marcha el nuevo concepto de peaje urbano, como ya se ha comentado, sería necesario que todos los vehículos en circulación dentro de la ciudad dispusieran de un transpondedor o unidad embarcada, que llamaremos dispositivo “H-Mobility”, con GPS integrado y conexión a internet. Con este dispositivo se podría saber en todo momento la posición de los vehículos, consumos, tipo de conducción, horarios de desplazamiento, así como la tarificación y coste del viaje. Además, el dispositivo podría prestar a los usuarios servicios adicionales (*avisos de tráfico, pago de estacionamientos, o cualquier otra transacción de pago electrónica dentro de la ciudad con establecimientos adheridos*). En la siguiente figura se muestra a la izquierda ejemplo del servicio reportado por la unidad de abordo y a la derecha diagrama del procesamiento de datos de la unidad embarcada.

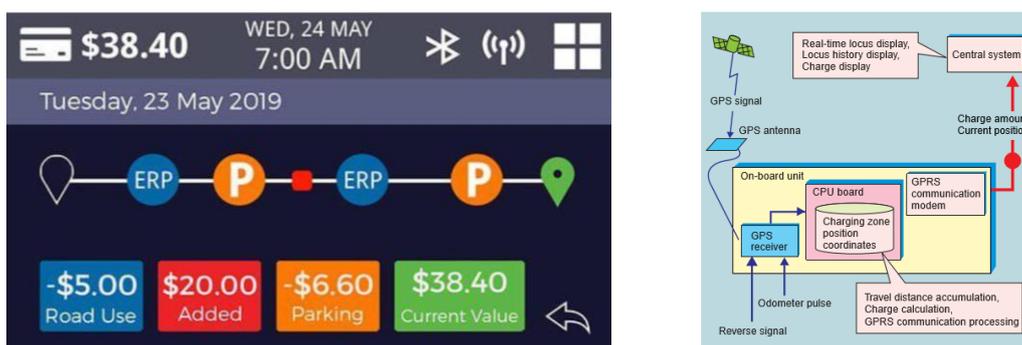


Figura 69. Servicio y diagrama de procesamiento del dispositivo OBU. Fuente: Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

La unidad de abordo estaría compuesta de un receptor GPS, una placa CPU y un módem de comunicación 4G, en un futuro 5G, para comunicarse con el sistema central o centro de control. La antena, que recibiría

la señal de los satélites GPS, Glonass o Galileo, estaría conectada al receptor GPS y al odómetro<sup>86</sup> del vehículo. El receptor GPS estaría equipado con un sensor uniaxial de velocidad de giro que permitiría obtener la dirección de desplazamiento del vehículo. Esta unidad de abordo recibiría los datos de posicionamiento del receptor GPS, en intervalos de un segundo, y calcularía el coste del peaje si el vehículo hubiera pasado por una zona tarifada. Al entrar en una zona de peaje la distancia de recorrido se acumularía hasta que el vehículo abandonase dicha zona, instante en el cual la unidad de abordo calcularía el coste del peaje. La distancia de recorrido en la zona y el importe del peaje se transmitirían al sistema central de control, a través de la red de comunicaciones 4G/Wifi. Además, la unidad de abordo podría almacenar los datos de posicionamiento recibidos desde los satélites, la distancia de viaje acumulada y el importe del peaje en su memoria interna. El sistema central recibiría estos datos y los almacenaría en su base de datos. Gracias a este proceso no sería necesario que el sistema central generase los datos de posicionamiento ni seguimiento vehicular, con lo cual las comunicaciones se verían menos afectadas incluso si el número de unidades embarcadas aumentase.

#### 10.4.2 Subsistema de Seguimiento y Localización de Vehículos (SLV)

El objetivo de este subsistema sería el cálculo de la posición y distancia recorrida por cada vehículo, dentro del área delimitada por el peaje urbano, durante el viaje. Para ello se propone una solución combinada, los vehículos llevarían instalado un dispositivo (OBU/GPS) con conexión inalámbrica a internet, que integraría los datos en una aplicación web accesible desde el smartphone (en la Figura 70 se muestra a la izquierda un ejemplo de unidad de abordo y a la derecha la interface de integración con el vehículo).



Figura 70. Ejemplo de equipo de abordo e integración en vehículo y “smartphone”. Fuente: TomTom Telematic.

La aplicación del sistema mostraría al usuario las diferentes alternativas de viaje y su respectivo coste (en la Figura 71 se muestra propuesta del entorno). El dispositivo embarcado enviaría en tiempo real los datos del viaje hacia un servidor; además este dispositivo podría almacenar estos datos para garantizar, en el caso

<sup>86</sup> Un odómetro es un instrumento de medición que calcula la distancia total o parcial recorrida por un cuerpo (generalmente por un vehículo) en la unidad de longitud en la cual ha sido configurado (metros, millas). Su uso está generalizadamente extendido debido a la necesidad de conocer distancias, calcular tiempos de viaje, o consumo de combustible.

de pérdida de comunicación, su envío hacia el centro de control. Este centro de control también tendría la función de asistencia al viaje, donde los operadores de sala podrían interactuar con el usuario proponiéndole rutas más rápidas y económicas, ayudándole a la movilidad, comunicación de emergencias, etc.

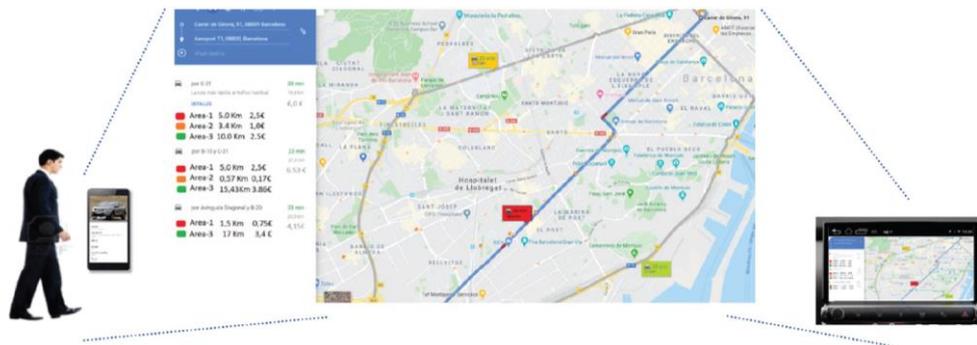


Figura 71. Representación de los distintos costes en función de la alternativa de viaje.

Todos los recorridos podrían visualizarse tanto desde el centro de control de tráfico como desde el vehículo o “smartphone”. Estos recorridos serían encriptados y almacenados. El registro podría ser accesible a los usuarios a través de su perfil específico. El sistema, además, podría realizar alertas cuando detectara vehículos fuera de un área previamente delimitada. Esta funcionalidad sería útil para días donde se produjeran en la ciudad eventos especiales o en periodo de obras donde fuera necesario delimitar y/o restringir una zona al tráfico.



Figura 72. Ejemplo de aviso de vehículo 007 rebasando un área restringida. Fuente: TomTom Telematic.

Todos los datos generados por el sistema serían procesados y analizados y permitirían a la ciudad disponer de patrones de movimientos. Estos se podrían utilizar para beneficiar a conductores con comportamientos eficientes de conducción e incluso para alertar a los centros de seguridad pública local o nacional sobre movimientos sospechosos de determinados vehículos. Con esta información se podrían generar informes de datos de viajes fiables y fáciles de comprender que incluirían información sobre las horas de salidas y llegadas, el tiempo de conducción, el tiempo que los vehículos están parados, distancias recorridas, ... Estos informes podrían ser enviados mensualmente a los usuarios del peaje que de forma fácil y sencilla tendrían los datos de sus viajes urbanos.



Figura 73. Ejemplo de reporte con la distancia recorrida por el usuario. Fuente: TomTom Telematic

### 10.4.3 Subsistema de vigilancia ambiental (SVA)

Como medida adicional se podría controlar el consumo de combustible y el coste ambiental generado por cada vehículo en la ciudad. Para ello, sería necesario instalar adicionalmente en el vehículo un dispositivo que llamaríamos H-ECO-Movilidad. Este dispositivo se conectaría por el puerto OBD-II<sup>87</sup> del vehículo. Con este nuevo dispositivo lograríamos información sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> y consumos de combustibles de los vehículos en circulación.



Figura 74. Ejemplo de dispositivo H-ECO Movilidad

Además, este sistema se concibe con un enfoque combinado con los Servicios de Monitoreo Atmosférico de Copernicus<sup>88</sup> (CAMS) y los Servicios de Cambio Climático (C3S) de tal manera que, con la ayuda de métodos de inteligencia artificial, a partir del análisis de los flujos de gestión del transporte se pudiera pronosticar la calidad del aire en diferentes zonas de la ciudad. Este hecho permitirá una visión de la gestión del tráfico global rápida e inteligente, viendo su impacto en tiempo real sobre el medio ambiente, proporcionando a los responsables datos objetivos con los que recomendar modificaciones de las tarifas de peaje o incluso sugerir cambio del medio de transporte.

<sup>87</sup> OBD (*On Board Diagnostics*) es un sistema de diagnóstico a bordo en vehículos (coches y camiones). Actualmente se emplean los estándares OBD-II (Estados Unidos), EOBD (Europa) y JOBD (Japón) que aportan un monitoreo y control completo del motor y otros dispositivos del vehículo. Los vehículos pesados poseen una norma diferente, regulada por la SAE, conocida como J1939.

<sup>88</sup> Copernicus es una iniciativa conjunta de la Comisión Europea y de la Agencia Espacial Europea. El principal objetivo de Copernicus consiste en observar el medio ambiente para entender mejor los cambios ambientales que se producen en la tierra, el por qué de estos cambios, su influencia en nuestras vidas y de ese modo contribuir a la protección del medio ambiente, la salud y seguridad de los ciudadanos. Para más información se puede consultar la web: <https://www.copernicus.eu/es>.

#### 10.4.4 Subsistema de Control e Infracción (SCI)

Para circular dentro de la zona urbana afectada por el peaje, los usuarios deberían estar previamente registrados dentro del sistema para poder realizar el pago electrónico del servicio. Este registro, que se podría realizar vía “web” o mediante “Smartphone”, generaría una base de datos con todos los vehículos autorizados para circular. Gracias a este registro el subsistema de control e infracción (SCI), formado por una serie de cámaras con reconocimiento automático de matrículas, se encargaría de sancionar a aquellos vehículos no autorizados. Estas cámaras, conectadas a un mini PC, formarían parte de un sistema ANPR que estaría continuamente verificando las matrículas de todos los vehículos en circulación. A nivel de arquitectura de sistema se propone una arquitectura distribuida para que, en caso de caída del sistema, se garantice el continuo almacenamiento en local de las infracciones.

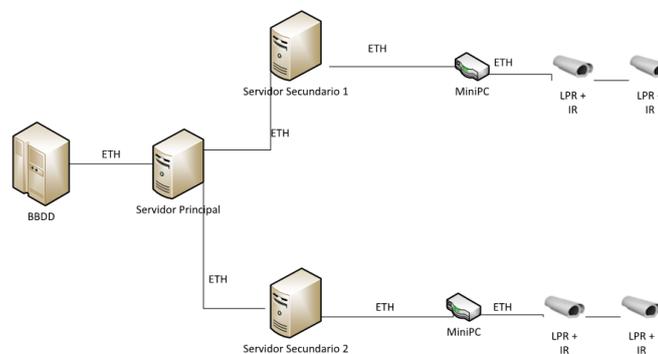


Figura 75. Ejemplo de arquitectura del subsistema (SCI). Fuente: Elaboración propia

#### 10.4.5 Subsistema de cobro (SC)

La realización del pago del peaje se realizaría mediante una plataforma tecnológica que habilitaría los servicios interactivos entre el conductor y el titular de la vía. El dispositivo de posicionamiento por satélite (con tecnología GNSS) podría ser el medio por el cual se realizaría el pago por uso del peaje urbano. Este dispositivo podría utilizar el propio dispositivo OBU o bien un teléfono móvil inteligente como soporte para realizar el pago electrónico. En la Figura 76 se muestra ejemplo con la propuesta de diseño del proceso de pago.

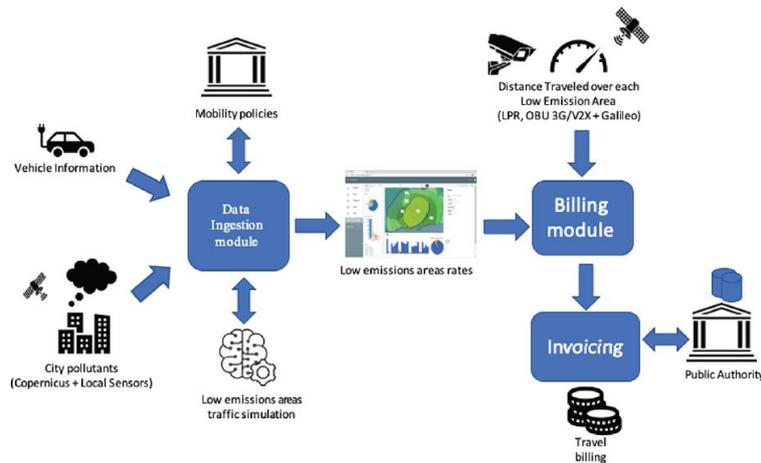


Figura 76 Representación del proceso para el pago de la tasa de peaje

En el caso de que el usuario quisiera realizar el pago mediante el teléfono inteligente, se debería descargar una aplicación, a través de los sistemas operativos iOS o Android, donde se registraría con sus datos personales y vincularía una tarjeta bancaria; el registro se validaría mediante la llegada de un correo electrónico; posteriormente se completarían los datos del vehículo y se añadirían tantas matrículas como fuese necesario; por último, se introducirían los datos de la tarjeta para efectuar el pago.

#### 10.4.6 Integración de los diferentes subsistemas

Cada uno de los anteriores subsistemas se integraría dentro del centro de control de tráfico en una plataforma “Smart Mobility” según las recomendaciones de la normativa UNE 178104:2017 que marca los requisitos de interoperabilidad de las plataformas “Smart-City”.



Figura 77 Integración de subsistemas en plataforma “Smart Mobility”

### 10.5 La Ley de protección de datos de carácter personal

La información generada por el nuevo modelo de peaje urbano sería uno de sus principales activos. La defensa de este activo sería una tarea esencial para asegurar la continuidad y el desarrollo, así como también una exigencia legal (protección de la propiedad intelectual, protección de datos personales, servicios para la sociedad la información), trasladando confianza a sus clientes y/o usuarios. El tratamiento de toda esa

información debería ajustarse a las normas comunitarias vigentes, entre otras, la Directiva 95/46/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de octubre de 1995, relativa a la protección de las personas físicas en lo que respecta al tratamiento de datos personales y a la libre circulación de estos datos, y la Directiva 2002/58/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de julio de 2002, relativa al tratamiento de los datos personales y a la protección de la intimidad en el sector de las comunicaciones electrónicas. El derecho a la protección de los datos personales está reconocido explícitamente por el artículo 8 de la Carta de los Derechos Fundamentales de la Unión Europea. En España, en ejercicio de la competencia que le atribuye el artículo 37.1.c) de la Ley Orgánica 15/1999, de 13 de diciembre, de Protección de Datos de Carácter Personal (LOPD), la Agencia Española de Protección de Datos dicta una instrucción para adecuar los tratamientos de imágenes con fines de vigilancia a los principios de dicha Ley Orgánica y garantizar los derechos de las personas cuyas imágenes son tratadas por medio de tales procedimientos.

## **11. METODOLOGÍA PARA ANALIZAR LA VIABILIDAD DEL NUEVO MODELO DE PEAJE URBANO**

### **11.1 Introducción**

Es de esperar que el nuevo modelo de peaje urbano propuesto impacte en las condiciones de tráfico de la ciudad, provocando una serie de efectos sobre su sistema de transporte. Para poder analizar la viabilidad socioeconómica y financiero del nuevo esquema de peaje, tendremos que saber qué efectos producirá en el tráfico urbano de la ciudad. Para ello, será necesario resolver un problema de transporte. En nuestro caso, puesto que el objetivo de esta tesis es tener una visión general de la magnitud del efecto, se plantea resolver el problema de tráfico aplicando un modelo tradicional de transporte de cuatro etapas. Estos modelos matemáticos toman como base la dinámica de fluidos y surgen de la idea de que una cantidad grande de vehículos se puede tratar como un continuo. En estos modelos no hay choques, tampoco pueden aparecer ni desaparecer de la nada vehículos. Este enfoque nos permite un análisis matemático por medio de una calibración automática, estimación de demandas y de estado. Con estos modelos podemos realizar simulaciones rápidas, que nos permiten probar muchas posibilidades en tiempo real. Además, en ellos la descripción se realiza en términos de variables globales del flujo de tránsito, tales como velocidad de los vehículos, flujo vehicular y densidad de tráfico. En nuestro caso, se establecerá como parámetro de comparación, entre las distintas tarifas aplicadas, la reducción en la matriz total del número de veh-km. Sin embargo, estos modelos tienen el inconveniente de que no pueden prever cuántos de esos viajes, una vez aplicado el peaje, hacen el cambio modal hacia otros medios de transporte. Este efecto lo intentaremos estimar con la ayuda de otro modelo independiente.

El modelo de tráfico parte de un grafo de transporte que, en nuestro caso particular, ha sido realizado con la ayuda del software informático Transcad a partir de una cartografía digitalizada. A través de este aplicativo informático también se han definido las características básicas de las distintas secciones de la red modelizada (carriles, anchura, velocidad, longitud, capacidad). La modelización de la red de transporte nos permite estimar los flujos de viajes y reproducir el patrón de movilidad de un grupo de usuarios entre las distintas zonas origen-destino en función del coste generalizado del viaje.

Caracterizado el escenario base podemos ejecutar un proceso de asignación de tráfico de tal forma que, a través de procesos iterativos, se pueda calibrar y obtener la matriz de distribución de viajes entre las diferentes zonas O-D de la red. Indicar que en nuestro caso el análisis de la demanda se centra en los usuarios del vehículo privado (convertidos en vehículos ligeros equivalentes) clasificados en función del tipo de viaje con distintos valores del tiempo. La susceptibilidad del escenario base ante la implementación del peaje urbano se puede estimar a través de la variación de una serie de indicadores, que se pueden valoran a través de criterios de operación (reducción de número de viajes o kilómetros recorridos, etc.), criterios económicos y financieros (ingresos, coste generalizado, tarifa, etc.) o indicadores sociales como la

variación de bienestar social. De esta forma, el modelo de tráfico nos debe permitir estimar la tarifa necesaria que permita cumplir con los objetivos del peaje urbano, es decir, reducir la congestión y mejorar la calidad ambiental en la ciudad. Finalmente, con los resultados del modelo de tráfico se realiza el análisis socioeconómico y financiero del proyecto para así poder comprobar su viabilidad.

A continuación, con la ayuda de la tesis doctoral de (Salas Rondon, M.H, 2009) “Análisis de estrategias tarifarias para la gestión de la movilidad en carreteras metropolitanas”, expondremos los principios teóricos utilizados para la resolución del modelo tráfico.

## **11.2 Modelización del escenario base**

Para lograr implementar con éxito un sistema de peaje urbano en una ciudad es necesario, primeramente, contar con información básica obtenida mediante la ejecución de un trabajo de campo unido a la recolección de datos que puedan suministrar los diversos organismos responsables de la movilidad y las infraestructuras. Esta información permitirá en primer lugar, caracterizar el territorio a través de varios parámetros como: población, parque automovilístico, nivel de renta, producción (industria, comercio, agricultura, etc.), servicios (transporte público, privado, comunicaciones, energía, etc.), planes de movilidad, etc., y, en segundo lugar, establecer zonas según el tipo de suelo y fronteras entre áreas urbanas y distritos. Estos datos básicos permitirán formar unidades homogéneas de la ciudad y categorizarlas para introducir elementos de análisis en la toma de decisiones durante la etapa de diseño del peaje urbano. La modelización del escenario base, además, requiere de un análisis de la oferta viaria y un estudio de la demanda que permitirán medir la susceptibilidad de este escenario ante la implantación de una tarifa de peaje urbano. La construcción final del escenario base, en nuestro caso, se ha realizado con la ayuda del aplicativo Transcad, mediante el cual se ha desarrollado una red vial que supone una simplificación de la lógica organizativa del transporte privado.

La oferta viaria del modelo la representan las infraestructuras de transporte que son la base de la actividad económica de un país o región, puesto que permiten la conexión del territorio y lo hacen accesible tanto a las relaciones sociales como a la producción de bienes servicios. Es por ello que dichas infraestructuras tienen como finalidad lograr que su uso sea lo más óptimo y rentable posible para la sociedad, asegurando la máxima funcionalidad. Esta funcionalidad puede ser medida en términos de distancias y tiempos de viaje que son proporcionales a la eficacia y a la estructura de la red dentro del territorio. Definimos como densidad viaria territorial a la relación entre la extensión de la red viaria (medida en kilómetros) y la superficie del territorio en estudio. Como se ha indicado, para definir el escenario base es necesario identificar e inventariar cada vial (número de carriles por sentido, velocidad de circulación, viales con peajes, viales libres, etc.). De esta forma se determinan varios parámetros para cada arco (físicos y operativos) que posteriormente se agruparan en una base de datos para toda la red. Para cada arco, se pueden fijar entre otros, los siguientes parámetros: longitud, tarifas, demanda actual tanto diaria como horaria y su distribución por categoría de tráfico, velocidad, coste generalizado, etc.

Con la información obtenida anteriormente, se elabora un grafo  $T = [N, A]$  del entorno de estudio, donde  $N$  corresponde al conjunto de nodos (intersecciones entre vías o entradas y salidas del municipio) conectados por los arcos que representan secciones de vía entre ellos. El conjunto  $A$  representa el total de arcos del grafo y para cada uno de ellos, se presentan sus correspondientes atributos (longitud, curvas flujo-velocidad, capacidad, número de carriles, carriles bus, etc.) que constituyen información necesaria para la conformación del escenario base y de esta forma establecer indicadores que permitan identificar las variaciones que se tengan al aplicar el futuro peaje.

En cuanto a la accesibilidad, por ejemplo, la podemos medir determinando la matriz de viajes de distancias mínimas, de tiempos mínimos o de costes mínimos entre los diferentes nodos de la red. Esta matriz utiliza algoritmos de caminos mínimos (por ejemplo, el de Dijkstra o el que se incluye en Transcad) para determinar la ruta más corta entre los diversos nodos. El algoritmo de Dijkstra, también llamado algoritmo de caminos mínimos es un algoritmo para la determinación del camino más corto dado un vértice origen al resto de los vértices en un grafo con pesos en cada arista. Su nombre se refiere a Edsger Dijkstra, quien lo describió por primera vez en 1959. La idea subyacente en este algoritmo consiste en ir explorando todos los caminos más cortos que parten del vértice origen y que llevan a todos los demás vértices; cuando se obtiene el camino más corto desde el vértice origen, al resto de vértices que componen el grafo, el algoritmo se detiene.

### 11.3 Principios teóricos para la modelización de la demanda

Existen diversos indicadores que, al implementar un peaje urbano, son susceptibles a cambiar. Estos indicadores pueden ser operacionales, económicos-financieros o sociales. Por ejemplo, en el caso de los indicadores operacionales el cambio puede venir motivado por la variación de viajes, viajes-km, viajes de ida-vuelta, viajes de trabajo, viajes de ocio, viajes negocios, viajes según sexo o edad, velocidad del medio de transporte, demanda de veh-km en vehículo privado o de transporte público, etc. En lo que respecta a los indicadores económicos serían los ingresos totales, coste generalizado, inversión, coste de mantenimiento o explotación del sistema de gestión tarifario, tarifa promedio, etc. Por último, en cuanto a los indicadores de aceptabilidad pública esta variación podría ser debida a la legibilidad y comprensión de los diferentes esquemas tarifarios, política de descuentos o exenciones, etc. Es recomendable obtener el número máximo de indicadores para definir detalladamente el escenario base, no obstante, dificultaría mucho comparar las distintas alternativas de peaje, por ello, en nuestro caso, se han utilizado algunos de los indicadores más relevantes.

Para la estimación de la demanda actual necesitamos conocer la matriz  $q_{ij}^0$  de viajes entre las diferentes zonas en que se divide la ciudad. En una situación genérica la estimación de una matriz, como la de la Tabla 33, es un proceso complejo, ya que requiere modelar los viajes de cada individuo dentro de la zona de estudio.

\_\_\_\_\_

<b>Orígenes \ Destinos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>j</b>	<b>n</b>	<b>P</b>
<b>1</b>	$T_{11}$	$T_{12}$	$T_{13}$	$T_{1j}$	$T_{1n}$	$P_1$
<b>2</b>	$T_{21}$	$T_{22}$	$T_{23}$	$T_{2j}$	$T_{2n}$	$P_2$
<b>3</b>	$T_{31}$	$T_{32}$	$T_{33}$	$T_{3j}$	$T_{3n}$	$P_3$
<b>I</b>	$T_{i1}$	$T_{i2}$	$T_{i3}$	$T_{ij}$	$T_{in}$	$P_i$
<b>M</b>	$T_{m1}$	$T_{m2}$	$T_{m3}$	$T_{mj}$	$T_{mn}$	$P_i$
<b>A</b>	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_j$	$A_n$	total viajes

**Tabla 33. Matriz genérica de orígenes y destinos.**

De acuerdo con (Ortúzar, 2000), la metodología del modelo clásico parte por considerar una red de transporte multimodal, una zonificación apropiada del área de estudio, y la recolección y codificación de datos para la calibración y validación de los modelos para su uso a nivel de predicción o estimación (escenario futuro para la planificación). Estos datos contienen entre otros aspectos: la identificación de los viajes que busca caracterizar los movimientos (origen y destino, tipo y propósito del viaje, horas de salida y finalización, medio de transporte, etc.) por cada uno de los miembros de un hogar. Otro aspecto fundamental es la información socioeconómica acerca de la población en cada zona de estudio, con la cual se busca obtener información aproximada del nivel de renta y tasa de motorización de los hogares. Con estos datos, obtenidos a partir de un estudio de origen y destino, se desarrolla el modelo de transporte de cuatro etapas: *generación, distribución, reparto modal y asignación*.

Los modelos clásicos de transporte basados en viajes, frecuentemente conocidos como modelos de 4 pasos (Castiglione J., Bradley M., 2014), son aceptados como herramientas válidas para la planificación de transporte y son utilizados para el planeamiento regional y urbano. El pronóstico de tráfico tradicionalmente se ha basado en modelos de cuatro etapas, los cuales fueron desarrollados inicialmente a nivel informático en Chicago y Detroit en 1950 en estudios de transporte. Este procedimiento usa datos agregados de subdivisiones del territorio (zona de análisis de tráfico) para estimar viajes con la red actual (Stopher et al., 1996). A continuación, se explica el funcionamiento general de estos modelos donde en la siguiente figura podemos ver su esquema general:



Figura 78. Modelo clásico de transporte de cuatro etapas. Fuente: www.uc.cl.

**PASO 1: generación de viajes** se obtienen los viajes producidos en cada una de las zonas  $P_i$  y los viajes atraídos  $A_j$ . Con esa información de “input” se calculan los valores de cada casilla de la matriz, que contiene el número total de viajes entre la zona “i” y “j”  $T_{ij}$ . Estos valores son el resultado de este paso del algoritmo.

$$T_{ij} = P_i * \frac{A_j * f(c_{ij})}{\sum_{i=1}^n (A_j * f(c_{ij}))} \quad (11.1)$$

Donde:

$T_{ij}$ : número de viajes de la zona “i” a la zona “j”.

$P_i$  : número de viajes generados en la zona “i”, del paso generación de viajes.

$A_j$  : número de viajes atraídos a la zona “j”, del paso generación de viajes.

$f(c_{ij})$ : función de impedancia.

$$f(c_{ij}) = \frac{1}{c_{ij}^b} \quad (11.2)$$

La anterior formulación matemática distribuye los viajes producidos de la zona “i” de manera proporcional a las atracciones de las zonas “j”. A su vez, la función de impedancia es la que permite que los viajes menos convenientes (más distantes, más costosos etc.) sean castigados.

Originalmente, “b” era asumido con el valor de 2.0, en analogía a la ley de la gravitación universal<sup>89</sup>. Al realizar el proceso de distribución, es posible que  $\sum_{i=1}^n A$  no sea igual a  $\sum_{j=1}^m P$ . Esto implica que se deba iniciar un proceso iterativo.

<sup>89</sup> La ley de gravitación universal es una ley física clásica que describe la interacción gravitatoria entre distintos cuerpos con masa. Fue formulada por Isaac Newton en su libro “Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica”, publicado en 1687, donde establece por primera vez una relación cuantitativa (deducida empíricamente de la observación) de la fuerza con que se atraen dos objetos con masa. Así, Newton dedujo que la fuerza con que se atraen dos cuerpos de diferente masa únicamente depende del valor de sus masas y del cuadrado de la distancia que los separa. Para grandes distancias de separación entre cuerpos se observa que dicha fuerza actúa de manera muy aproximada como si toda la masa de cada uno de los cuerpos estuviese concentrada únicamente en su centro de gravedad, es decir, es como si dichos objetos fuesen únicamente un punto, lo cual permite reducir enormemente la complejidad de las interacciones entre cuerpos complejos.

La diagonal de la matriz O-D representan los viajes internos de cada zona, es decir los viajes que se originan y tienen destino en la misma zona. Los resultados de estos pasos deben presentarse aproximados a la unidad más próxima. Es posible que no existan viajes entre algunos pares origen-destino. En esos casos los resultados del desarrollo matemático pueden ser valores muy bajos.

**Paso 2: Distribución de viajes.** Este resultado a su vez alimenta al sub-modelo de distribución de viajes (paso 2). Esa información extra requerida es usualmente una matriz de tiempos entre zonas. Este modelo hace parejas entre los orígenes y los destinos para crear viajes. Estos viajes se consignan en la matriz origen-destino. El algoritmo clásico de modelización de transporte se alimenta de:

- La cantidad de viajes producidos y atraídos por zona.
- Una matriz de costes interzonales.

El resultado del paso 2 del algoritmo clásico de modelización de transporte es la cantidad de viajes entre todos y cada uno de los orígenes y destinos (zonas), también conocida como matriz Origen-Destino. Esta información a su vez alimentará el paso 3 del algoritmo: El modelo de selección modal.

**Paso 3: Selección modal.** El sub-modelo del paso 3 (selección modal) divide el total de los viajes entre cada pareja de zonas por modos. Para esto, se debe tener información detallada de la red y la provisión de transporte público y transporte privado, además del número de viajes entre zonas que se obtuvo del paso 2. El resultado de este viaje son varias matrices con viajes, una para cada modo.

**Paso 4: Asignación de viajes.** La asignación de viajes (también conocida como selección de ruta) permite obtener como resultado final del modelo, la cantidad de viajes que pasan por cada uno de los arcos en diferentes modos. Así, basados en el principio de la minimización del tiempo de viaje y de que el tiempo de viaje aumenta con la congestión, las diferentes matrices de viajes son asignadas a las diferentes redes de transporte (red vial, red de transporte público, etc.) para determinar qué ruta tomarán los viajeros.

Si se sigue la secuencia jerarquizada del modelo de cuatro etapas, se constituye la condición ideal para conseguir un modelo de demanda ajustado a la situación real de la zona de estudio. Sin embargo, existen modelos simplificados desarrollados a partir de conteos de tráfico que presentan las siguientes ventajas:

- c) Actualización periódica de matrices de movimiento de pasajeros o carga usando información histórica y conteos actuales;
- d) Estimación de matrices para zonas de menor tamaño;
- e) Desarrollo de modelos simplificados para ser utilizados como elementos de un proceso de planificación continúa.

En estos modelos simplificados se considera que el flujo vehicular de vehículos observados en unos puntos, es el resultado de una matriz de movimiento  $q_{ij}^0$  y de un proceso de asignación de ésta a la red de transporte, (Ortúzar, 2000).

En el grafo  $\Gamma = \{NA\}$  de la zona de estudio, la matriz de movimiento tendrá un total de  $N^2$  incógnitas, una por cada celda de la matriz. Un elemento importante en la estimación de  $q_{ij}^0$  es la identificación de los pares O-D que utilizan cada ardo  $a \in A$ . Para ello, se emplean varios métodos para la asignación del tráfico en una red, donde la demanda para cada arco puede estimarse utilizando la expresión (11.3)

$$q_a^0(r, k) = \sum_i \sum_j \sum_{p \in P_{ij}} \delta_{ij}^{ar} f_{ij}^{0,p}(r, k) \quad (11.3)$$

Donde:  $q_a^0(r, k)$  corresponde a la demanda en el arco  $a$  expresada en (veh/día o viajes/día), el superíndice 0 indica que es la situación actual de la red viaria de gran capacidad,  $r$  es el nivel de renta de los usuarios de la vía,  $k$  corresponde a las categorías de vehículos ligeros, pesados 1 y pesados 2 respectivamente,  $ij$  corresponde al par origen destino ( $ij \in W$ , donde  $W$  es el conjunto de pares O\_D en toda la red),  $p$  son las diversas rutas o caminos que pueden seguir los conductores para realizar el viaje  $ij$  ( $P_{ij}$  es el conjunto de todas las rutas entre el par O-D  $ij \in W$ ),  $\delta_{ij}^{ar}$  variable binaria, que toma el valor de 1 si la ruta  $r$  usa el arco  $a$  y 0 en caso contrario,  $f_{ij}^{0,p}(r, k)$  corresponde al flujo actual de los diversos tipos de vehículos según el nivel de renta en la ruta  $p \in P_{ij}$ .

La expresión (11.3) se puede simplificar evaluando un grupo de usuarios homogéneos (con el mismo nivel de renta y valoración del tiempo) convirtiendo las diferentes categorías de vehículos en vehículos ligeros equivalente, como se establece en el “*Highway Capacity Manual (2000)*”<sup>90</sup>, en el que los vehículos tienen un factor de equivalencia vehicular ( $f_{ev}$ ) con valor superior a 1 dependiendo de la pendiente longitudinal de la vía. Por tanto, dicha expresión se reduce a:

$$q_a^0 = \sum_{ij \in W} \sum_{p \in P_{ij}} \delta_{ij}^{ar} q_{ij}^{0,p} \quad (11.4)$$

El cálculo de los flujos en cada una de las distintas rutas involucra la solución de un problema de equilibrio de demanda “*problema de asignación de tráfico*”, donde la noción de equilibrio (en el análisis de redes de transporte) nace de la dependencia que tiene el tiempo (coste) de viaje con respecto al flujo para desplazarse desde un origen hasta un destino pasando por los arcos que conforman una ruta determinada. Este problema de equilibrio de usuario se plantea como un problema matemático de minimización con restricciones, el

<sup>90</sup> El “*Highway Capacity Manual*” es un manual publicado por el TRB (Transportation Research Board) que es una de las seis divisiones principales del Consejo Nacional de Investigación de EEUU, que sirve como asesor independiente del Gobierno federal sobre cuestiones científicas y técnicas de importancia nacional, y que es administrado conjuntamente por la Academia Nacional de Ciencias, la Academia Nacional de Ingeniería, y el Instituto de Medicina. La misión de la Junta de Investigación de Transporte es proveer liderazgo en innovación y progreso en el transporte a través de la investigación y el intercambio de información, conducido dentro de un ambiente objetivo, interdisciplinario y multimodal. La Junta cuenta con el apoyo de departamentos estatales de transporte, agencias federales incluyendo las administraciones componentes del Departamento de Transporte de los Estados Unidos y otras organizaciones e individuos interesados en el desarrollo del transporte.

cual fue propuesto por (Beckmann, M.J.; Mcguire, C.B.; Winsten, 1956), para más información ver (Sheffi, 1985).

Para solucionar este problema es razonable asumir que cada conductor intenta minimizar sus propios costes de viaje cuando se desplaza desde un origen hasta un destino, pero dado que, entre las varias rutas a elegir los costes cambian con la cantidad de flujo que se tenga en cada arco atravesado, la condición estable se alcanza cuando se cumple el principio de Wardrop. Esto es lo que caracteriza la condición de *equilibrio de usuario (UE)*. El primer principio de Wardrop, dice: “Los tiempos de viaje en todas las rutas son iguales (entre ellos), y menores al tiempo que experimentaría cualquier vehículo que decidiera cambiar a otra ruta. En este caso, cada usuario, actuando de forma NO-cooperativa, es decir de forma egoísta, busca minimizar sus propios costes de transporte. Los flujos de tráfico que satisfacen este principio de equilibrio se definen como de tipo de “equilibrio de usuario (UE)”, ya que cada usuario elige el camino que es mejor para sí mismo. En resumen, este equilibrio se alcanzaría cuando ningún usuario pueda bajar más su tiempo de viaje (coste de transporte) por medio de una acción unilateral.

Para lograr la condición (UE) se deben hacer varios supuestos, entre ellos asumir que todos los conductores poseen una conducta semejante y que disponen de una buena información respecto al coste de viaje en cada posible ruta y que toman la decisión correcta a la hora de elegir. En estos supuestos se debe hacer una distinción entre el tiempo de viaje que los individuos perciben y el actual tiempo de viaje. El tiempo de viaje percibido puede aproximarse a una variable aleatoria distribuida a través de la población de conductores. Es decir, cada conductor percibe un tiempo de viaje distinto sobre un mismo arco. El equilibrio se logra cuando *ningún conductor cree que su tiempo de viaje puede ser mejorado de forma unilateral cambiando su itinerario de viaje unilateralmente, que caracteriza la condición de equilibrio de usuario (UE)* propuesto por (Daganzo & Sheffi, 1977).

Estos métodos son de naturaleza determinista y suponen que los conductores son perfectamente racionales e idénticos y que tienen un conocimiento completo de la red y sus flujos. Esto no suele ocurrir en la realidad y en el caso de redes arbitrarias se suelen recurrir a modelos estocásticos. Aunque el *método de equilibrio de usuario (UE)* no es completo en la determinación de la dinámica conductual de los conductores en la elección de la ruta, sí que estos métodos dan una buena naturaleza macroscópica del diseño del sistema de transporte. Además, ayudan a la elaboración de otros modelos con asignaciones basadas en *Stochastic User Equilibrium (SUE)* que pueden aproximar más correctamente el proceso de toma de decisión del conductor sobre la elección de ruta. En los modelos basados en una asignación estocástica los conductores no tienen un conocimiento completo de las condiciones de la red. Estos modelos asignan viajes a caminos alternativos mediante la asignación de probabilidades. Estas probabilidades representan la probabilidad de moverse de un nodo a otro usando un enlace particular (Shivam Gupta, 2010).

En nuestro trabajo para garantizar una mejor consistencia y convergencia del modelo a la hora de utilizar diferentes escenarios se usa una asignación basada en el *User Equilibrium (UE)* puesto que es suficiente

para los objetivos que se pretenden con esta tesis. Un método de asignación SUE, por su propia definición, dado que incorpora un cierto grado de desconocimiento de la red o de incertidumbre sobre el tiempo de viaje por parte de los usuarios, tiene un acercamiento derivativo inferior y con más problemas de convergencia. El problema de asignación del tráfico en redes de carreteras actualmente se resuelve empleando software especializado. En nuestro caso se utiliza Transcad, aunque existen otros programas como Saturn, Visum, Emme/2.

En el caso de Transcad, para alcanzar la situación de equilibrio, en cada iteración se calculan los flujos en cada arco de la red, incorporando los efectos de la congestión y del tiempo de viaje, hasta llegar a una situación de equilibrio entre tiempos y flujo. La formulación del proceso iterativo se basa en el algoritmo creado por Frank y Wolfe en 1956 o también conocido como método (FW) que fundamentalmente consiste en que suponiendo que el coste  $C_a$ , en cualquier segmento "a" es función del flujo  $X_a^1$ , y que las funciones de rendimiento están aumentando, entonces los flujos  $X_a$ , satisfacen el primer principio de Wardrop y son únicos e iguales minimizando la ecuación (11.5)

$$\min z(x) = \sum_a^x \int_0^1 c_a(u) du \quad (11.5)$$

(Le Blanc, 1973) desarrolló el método FW, obteniendo un algoritmo más eficiente para resolver este problema. El tiempo de viaje,  $C_a$ , puede incluir numerosos componentes reflejando el tiempo de viaje, el número de paradas, la seguridad, el consumo de combustible, etc. Muchas de estos componentes pueden ser expresados como una función del tiempo de viaje. Por lo tanto, el tiempo de viaje,  $t_a$ , se utilizará en lugar del coste del viaje. En aras de la exhaustividad, Leblanc en 1975 propone por primera vez un algoritmo que converge al problema de equilibrio del usuario (UE) para el caso de demanda fija. El problema se formula de la siguiente forma:

$$\min z(x) = \sum_{ij} \int_0^{x_{ij}} t_{ij}(u) du \quad (11.6)$$

$$\text{st: } D(j, s) + \sum_i x_{ij}^s = \sum_k x_{jk}^s \quad s = 1, \dots, p \quad (11.7)$$

$$j = 1, \dots, n$$

$$j \neq s$$

$$x_{ij}^s > 0 \quad s = 1, \dots, p$$

Donde:

n: número de nodos de la red

$p$ : número de origen y destino

$x_{ij}$ : flujo total a lo largo del arco  $(i, j)$

$x_{ij}^s$ : flujo en el arco  $(i, j)$  con destinación  $s$

$D(j, s)$ : flujo originado en el nodo  $j$  con destino  $s$

En la última década, para mejorar los tiempos de convergencia, han surgido los llamados métodos de alta convergencia que obtienen una solución mucho más cercana al equilibrio de usuario, aunque con un mayor tiempo de ejecución y recursos. En esta línea TRANSCAD implementa este tipo de algoritmos como el algoritmo Biconjugado de Frank & Wolfe, que es el que se ha utilizado en este trabajo.

#### 11.4 Estimación teórica del coste generalizado y recaudo bruto

Un usuario decidirá sobre el medio de transporte a utilizar para realizar un desplazamiento en función de la suma de los costes que intervengan en el viaje (coste generalizado), de su salario y de la disponibilidad de los medios de transporte que existan. Es decir, podemos definir el coste generalizado de un desplazamiento como una función  $g(r, k)$  donde “ $r$ ” es el nivel de renta y “ $k$ ” el tipo de transporte.

La definición en el escenario base de la función del coste generalizado para viajar entre el par origen-destino  $ij \in W$  siguiendo cualquier ruta  $p \in P_{ij}$ , corresponde a la suma de los costes sobre cada arco que comprende dicha ruta, y viene definida por:

$$g_{ij}^{0p}(r, k) = \sum_{a \in A} \delta_{ij}^{ap} g_a^0(r, k) \quad (11.8)$$

Donde:  $\delta_{ij}^{ap}$  variable binaria, que toma el valor de 1 si la ruta  $p$  usa el arco  $a$  y 0 en caso contrario y  $g_a^0(p, k)$  es el coste generalizado del arco  $a$ , donde para la situación actual, se determina mediante la combinación lineal de los diversos costes que se indican en la expresión (9.12)

$$g_a^0(r, k) = f_a^0(r, k)l_a + v_t(r)t_a^0(q_a^0) + \tau_a^k(k) \quad (11.9)$$

Donde:  $f_a^0(r, k)$ , dado en (€/veh-km), corresponde a los costes de operación vehicular, estimados como suma de los costes por posesión del vehículo y los costes relacionados con el movimiento del vehículo, para mayor información (Robusté et al., 1999);  $l_a$  es la longitud del arco  $a$  (km);  $v_t(r)$  es el valor monetario del tiempo (€/veh-min);  $t_a^0(q_a^0)$  es el tiempo medio (min) que se gasta en recorrer el arco  $a$  y  $\tau_a^k(k)$  es el peaje urbano (€/veh).

La cuantificación del valor del tiempo  $v_t(r)$  se estudia dentro de la teoría microeconómica con modelos de elección discreta, en los cuales se relaciona su magnitud con el salario del individuo que enfrenta el problema de elección del modo de transporte.

En cuanto al tiempo de viaje en un arco  $t_a^0(q_a^0)$ , éste se puede estimar de manera directa o indirecta. Si se estima de manera directa se pueden aplicar distintas metodologías entre las que destacan: el método del coche flotante, estrategias de identificación vehicular entre varios puntos de control de entradas y salidas o entre estaciones de pago de peajes, o empleando medios tecnológicos a través del sistema ITS (Intelligent Transportat System) y satelital GPS (Global Positioning System). Un método extendido durante los últimos años es la de sistemas de gestión del tráfico e información inteligente en tiempo real basado en redes inalámbricas. Esta tecnología funciona en la banda de frecuencia de 2,4 GHz y explora las señales de Bluetooth y Wifi emitidas por los dispositivos móviles (teléfonos móviles, navegadores GPS, kits de manos libres, etc.). El sistema hace uso de datos anónimos de las señales captadas por las antenas con el fin de proporcionar información relacionada con el flujo de tráfico en diferentes entornos (urbano, interurbano).

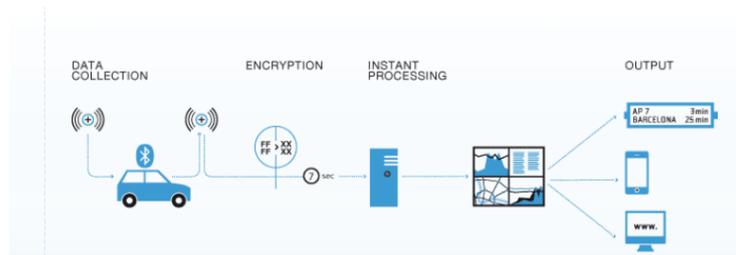


Figura 79. Esquema de funcionamiento de equipos Wifi/Bluetooth para cálculo de tiempos de recorrido

En cuanto a las estimaciones indirectas, se relaciona el tiempo de viaje con las variables macroscópicas de la teoría del flujo vehicular (densidad, velocidad y flujo). Existen una variedad de formulaciones empleadas para estipular el tiempo de viaje en función del flujo de vehículos en el arco dentro del proceso de asignación. En general, a estas relaciones se las conoce como funciones flujo-demoras o de congestión, y entre otras, destacan: la función del *Bureau Public Roads (BPR, 1964)*, la función (HCM, 2000), la función cónica de congestión usada en EMM/2 (Spies, 1900) y la función del Instituto de Transporte de Israel (IITPR) cuya expresión se basa en la función Logic (Manual Transcad, 2005)

La función de demoras del “Bureau of Public Roads (BPR)<sup>91</sup>”, que es que la que utilizaremos en la aplicación práctica de nuestro problema, plantea el tiempo de viaje  $t_a^0(q_a^0)$  como una función creciente de la relación flujo/capacidad en el arco  $a$  expresada como:

$$t_a^0(q_a^0) = t_a' \left[ 1 + k \left( \frac{q_a^0}{c_a'} \right)^\lambda \right] \quad (11.10)$$

Donde  $t_a^0(q_a^0)$  corresponden al tiempo de viaje y al flujo en el arco “ $a$ ” y se pueden obtener a través de Transcad después de un proceso de asignación,  $t_a'$  es el tiempo de viaje a flujo libre y  $c_a'$  es la “capacidad práctica” del arco “ $a$ ” la cual se determina empleando el manual de capacidad, *Highway Capacity Manual (2000)*. Los parámetros  $k$  y  $\lambda$  del modelo están vinculados al tráfico y se deberían calibrar (sobre todo si se

<sup>91</sup> Dentro de los modelos de asignación de tráfico, la relación entre el tiempo de viaje y el volumen de tráfico es comúnmente descrita por la formulación del Bureau of Public Roads (BPR). Generalmente, los valores de los parámetros de la función BPR están predefinidos basados en la práctica. La formulación proporciona el tiempo medio de viaje de un vehículo dentro de un segmento de una red de transporte.

quieren incluir los efectos aproximados de las demoras en las intersecciones asociadas al arco), generalmente se adoptan los valores de  $k=0.15$  y  $\lambda=4$  (Sheffi, 1985).

Con los valores del tiempo de viaje para cada arco  $t_a^0(q_a^0)$ , podemos determinar el tiempo de viaje actual ( $t_{ij}^0$ ) entre las distintas zonas O-D a través de un proceso de caminos mínimos que incorpora Transcad y que emplea la siguiente expresión:

$$t_{ij}^{0p} = \sum_a \delta_{ij}^{ap} t_a^0(q_a^0) \quad (11.11)$$

Donde  $\delta_{ij}^{ap}$  es la variable binaria (delta de Kronecker), que toma el valor de 1 si la ruta “p” usa el arco “a” y 0 en caso contrario.

En cuanto al peaje  $\tau_a^0(k)$ , es de esperar que en una red puedan presentarse arcos con peajes y otros sin peajes, por lo tanto, se define el subconjunto de arcos de la red con peajes como  $A_\tau$  donde  $A_\tau \subset A$ . Por tanto, el peaje que pagaría un vehículo determinado “k” para viajar entre el par origen-destino  $ij \in W$  siguiendo cualquier camino  $p \in P_{ij}$ , estará dado por:

$$\tau_{ij}^{0p}(k) = \sum_a \delta_{ij}^{ap} \tau_a^0(k) \quad \begin{array}{l} \tau_a^0 = 0, \text{ si } a \notin A_\tau \\ \tau_a^0 > 0, \text{ si } a \in A_\tau \end{array} \quad (11.12)$$

Donde:  $\delta_{ij}^{ap}$  es la variable binaria, que toma el valor de 1 si la ruta p usa el arco “a” y 0 en caso contrario.

A partir del cobro del peaje en el arco  $\tau_a^0 > 0, \text{ si } a \in A_\tau$ , se capta el ingreso bruto actual del sistema, que debería conservarse al implementar la tarifa de gestión de la movilidad para no alterar el equilibrio económico financiero de una posible concesión o sistema. Por consiguiente, el recaudo bruto según el tipo de vehículo tanto en el arco “a” como entre el par origen-destino  $ij \in W$  siguiendo cualquier ruta  $p \in P_{ij}$ , se determina mediante las expresiones:

$$I_a^k(k) = q_a^0(k) \tau_a^0(k) \quad a \in A_\tau \quad (11.13)$$

$$I_{ij}^{0p}(k) = q_{ij}^{0p}(k) \tau_{ij}^{0p}(k) \quad p \in P_{ij} \quad (11.14)$$

En el caso de convertir todos los vehículos a livianos equivalentes y sumar el ingreso que se capta entre los diferentes pares O-D de la red, se obtiene que el recaudo bruto total  $I_T^0$  está dado por:

$$I_T^0 = \sum_{ij \in W} q_{ij}^0 \tau_{ij}^0 \quad (11.15)$$

Para determinar la tarifa urbana a aplicar en la red, se deben realizar iteraciones sucesivas con diferentes tarifas hasta conseguir la reducción deseable de vehículos-kilómetros en la red. En nuestro caso particular, se utilizará una tarifa tipo kilométrica, aunque se podrían emplear tarifas que puedan variar según la hora

del viaje (mayor valor durante las horas punta), o incluso las *características del vehículo*. Promoverían la implementación y el uso de sistemas electrónicos de cobro.

### 11.5 Modelo de reparto modal en el continuo urbano de Barcelona

Ya hemos comentado que, para la aplicación práctica del nuevo sistema de peaje, hemos utilizado un modelo de transporte tradicional que toma como base la dinámica de fluidos y considera a los vehículos como un continuo. Esto implica que una vez aplicada la condición externa de “peaje”, los vehículos no pueden aparecer ni desaparecer de la nada. Podemos decir, por tanto, que el modelo puede predecir de una manera razonable la demanda del tráfico privado en la red. En nuestro caso particular, como es de esperar, el modelo de tráfico predice, a medida que vamos aumentando la tarifa, una mayor transferencia de viajes en vehículo privado hacia rutas alternativas gratuitas (principalmente hacia la red secundaria y rondas orbitales). Sin embargo, a medida que estas vías gratuitas van absorbiendo más viajes y se van saturando, el modelo se va alejando progresivamente de la realidad, pues no contempla la transferencia de viajes hacia otros medios de transporte. Por ello, para intentar aproximar la solución a la realidad necesitamos aplicar un modelo de reparto modal, que nos permita predecir qué porcentaje de viajes se transfieren a otros medios de transporte (fundamentalmente transporte público). Puesto que nuestro modelo de transporte tradicional no implementa esta opción, nos hemos apoyado en un modelo de reparto modal desagregado del problema de transporte. Este modelo de reparto modal ha sido realizado por la empresa Mcrit<sup>92</sup> en el año 2008, fruto de un estudio realizado para la “Generalitat de Catalunya-Departament de Política territorial i Obres Públiques” denominado “Modelización del reparto modal en el continuo urbano central de Barcelona (CUCB)<sup>93</sup>”.

El citado estudio desarrolla un modelo de reparto modal para el ámbito del continuo urbano central de Barcelona (CUCB), que esta soportado por una serie de encuestas sobre la percepción que tienen los usuarios sobre los diferentes medios de transporte. El objetivo del estudio es tratar de averiguar qué factores influyen en la elección modal y cuál es la disponibilidad a pagar. El fundamento teórico sobre el que se basa este modelo es que, al enfrentarse a varias alternativas o medios de transporte, las personas le asignan una utilidad a cada uno de los medios y eligen el que maximiza su utilidad.

$$U_{ji} = \alpha \text{ precio}_{ji} + \beta \text{ tiempo de viaje}_{ji} + \chi \text{ tiempo de acceso y dispersión}_{ji} + \delta \text{ frecuencia}_{ji} \quad (11.16)$$

$$U_{ki} = \alpha \text{ coste (peaje - aparcamiento)}_{ki} + \beta \text{ tiempo de viaje}_{ki} + \eta \text{ constante} \quad (11.17)$$

<sup>92</sup> MCRIT SL. (www.mcrit.com) es una empresa de ingeniería de transporte fundada en 1988 por ingenieros de la Universidad Politécnica de Cataluña- Barcelona Tech interesados en la evaluación de impacto de políticas. "

<sup>93</sup> CUCB (Continuo Urbano Central de Barcelona): es el ámbito de estudio del modelo que agrupa aquel territorio que es o será utilizado por el transporte público (medios ferroviarios y/o autobús). Agrupa los siguientes municipios: Barcelona, Badalona, Sant Adrià del Besòs, Montgat, Tiana, Santa Coloma de Gramanet, Montcada i Reixac, l'Hospitalet, Esplugues, Cornellà, San Joan Despí, Sant Feliu, Sant Just Desvern, Sant Boi y el Prat.

$$U_{ji} \text{ es la utilidad asociada a cada modo de transporte público } j \text{ para el par OD } i. \quad (11.18)$$

$$U_{ki} \text{ es la utilidad asociada al vehículo privado para el par OD } i. \quad (11.19)$$

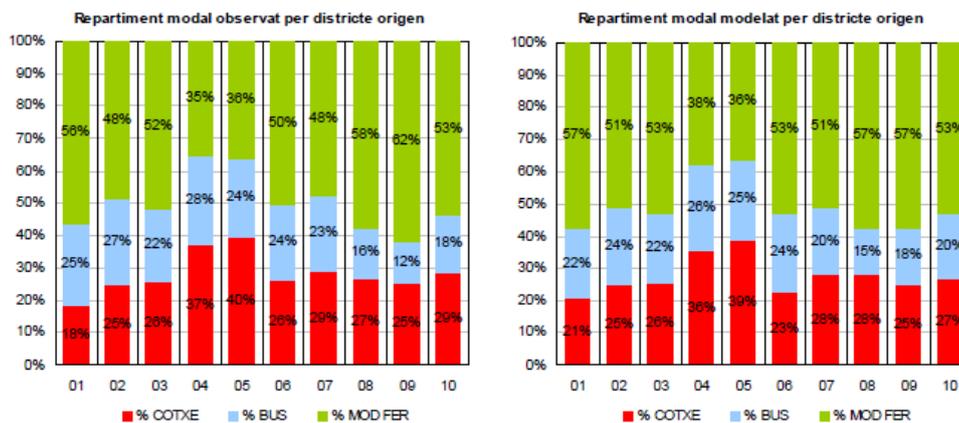
$$\alpha, \beta, \chi, \delta \text{ son los coeficientes asociados a cada una de las variables y } \eta \text{ el asociado a la constante modal.} \quad (11.20)$$

El coeficiente asociado a la constante modal refleja la preferencia de los usuarios a cada medio de transporte. En la siguiente tabla se adjuntan los parámetros del modelo final utilizado para la matriz de viajes”, segmentada por tipo de movilidad, calibrados para aquellos usuarios que pueden elegir entre el vehículo privado y el transporte público, es decir, para “usuarios no captivos del transporte público”.

Modelo	Segmento	Juego elección	Función utilidad					Valoraciones monetarias				Pesos			Propiedades		Muestra	
			Coste	Tv	Tesp	Tacc	Cte en veh	V tiempo (€ / h)	V t esp (€ / h)	V t acc (€ / h)	V cte (€)	Vo esp/ vot	Vo acc/ vot	Vo cte/ vot	Rho adjusted	Log likelihood	Observ en el segmento (1 indiv = 9 obs)	Encuestas
NO CAUTIVOS	Obligada	Árbol	Coef -0,3602 t-stat -16,5	-0,0346 -6,0	-0,0682 -4,9	-0,0622 -6,2	5,8	11,4	10,4	0,0	2,0	1,8	0,0	0,16489	-1414,25	4707	523	
	No Obligada	Árbol	Coef -2,7539 t-stat -6,9	-0,1906 -10,0	-0,1867 -5,8	-0,3346 -12,6	4,2	4,1	7,3	0,0	1,0	1,8	0,0			4707	523	

**Tabla 34. Parámetros utilizados en el modelo de reparto modal para usuarios no captivos del transporte público. Fuente: Mcrit, 2008**

En la Figura 80 se adjuntan los resultados obtenidos por Mcrit fruto de la aplicación práctica del modelo en el continuo urbano central de Barcelona (situación sin peaje).



**Figura 80. Cuotas modales observadas y modeladas en los diferentes distritos de Barcelona. Fuente: (Mcrit, 2008).**

Indicar que el modelo de reparto modal desarrollado por Mcrit utiliza únicamente los siguientes medios de transporte: vehículo privado, autobús y medios ferroviarios; además para su aplicación práctica necesitamos los tiempos medios de desplazamiento de cada viaje, antes y después del peaje. Estos tiempos se han obtenido a partir del modelo de tráfico desarrollado. Al no existir experiencias en otras ciudades, que hayan aplicado un modelo de peaje similar al planteado en esta tesis, y debido a la limitación de los modelos

utilizados se realiza una simulación de Montecarlo, sobre el porcentaje de viajes transferidos hacia el transporte público, de cara a acotar los riesgos en el análisis socioeconómico y financiero. Para ello, además nos hemos apoyado en un estudio realizado por el RACC<sup>94</sup> en diciembre de 2019, que analiza el impacto de la zona de bajas emisiones de Barcelona<sup>95</sup> sobre la demanda de transporte público.

## **11.6 Análisis socioeconómico y financiero del proyecto**

Una vez resuelto el problema de transporte, para poder comprobar la viabilidad del proyecto, finalizaremos el estudio realizando un análisis socioeconómico y financiero del proyecto, tanto desde el punto de vista social como económico. Ambos análisis se explican con detalle en el capítulo 12, no obstante, a continuación, resumimos los conceptos más importantes del mismo.

En el análisis socioeconómico se pretende evaluar los beneficios sociales y económicos del proyecto a partir del análisis de los siguientes factores:

- a) Efecto económico del sistema de peaje urbano sobre el sistema de transporte, para lo que analizaremos la variación del bienestar social en los diferentes tipos de viajes, los ahorros de coste de funcionamiento del vehículo privado, los costes de inversión del sistema, así como los costes de operación del transporte público adicional necesario para atender la nueva demanda.
- b) Efecto económico de la puesta en marcha del nuevo sistema de peaje urbano, para lo cual analizaremos la inversión, mantenimiento y explotación del sistema de peaje urbano.
- c) Efecto económico de las externalidades como el cambio climático, polución y ruido.
- d) Efecto económico del sistema de peaje urbano sobre la salud de los ciudadanos.

Una vez evaluados los efectos económicos de estos factores veremos sus resultados en la cuenta de pérdidas y ganancias, tanto para el primer año como para un periodo del proyecto de 10 años. Posteriormente, a partir de la selección de una serie de variables aleatorias claves, se realiza un análisis de sensibilidad de los resultados, aplicando el método de Montecarlo con la ayuda del software @Risk. De esta forma pretendemos ver cómo afectan esas variables a los indicadores de rentabilidad.

Por último, en el análisis financiero se analiza la rentabilidad del proyecto desde el punto de vista financiero. Trataremos, por tanto, identificar y sistematizar la información de carácter monetario (inversión, ingresos y gastos) con el fin de evaluar el proyecto y determinar su viabilidad y rentabilidad financiera, en función de los distintos escenarios tarifarios planteados. Una vez seleccionado el mejor esquema tarifario se realiza

---

<sup>94</sup> El Real Automóvil Club de Cataluña, abreviado RACC, es un club de automovilistas catalán constituido en 1906 que cuenta con casi 1.000.000 de socios, lo que le convierte en el más grande de España y en una organización de referencia internacional en el ámbito de la movilidad.

<sup>95</sup> El 1 de enero de 2020 se activó en Barcelona la Zona de Bajas Emisiones (ZBE) en el área delimitada por la Ronda de Dalt y la Ronda Litoral. Las Rondas se encuentran excluidas de la (ZBE). El objetivo de la medida es mejorar la calidad del aire de la ciudad de Barcelona y su área metropolitana. Dentro de la nueva (ZBE) sólo pueden circular los vehículos con etiqueta ambiental de la DGT que tengan la siguiente categoría: Zero Emisiones, Eco, C y B. Los vehículos sin distintivo ambiental no pueden circular.

un análisis de riesgo de sus resultados, con el fin de examinar la variabilidad del resultado a causa de posibles amenazas que podrían hacer variar el valor de ciertos indicadores. A diferencia del estudio socioeconómico, el análisis financiero del proyecto se estudia sólo a largo plazo (10 años).

## **12. APLICACIÓN A LA CIUDAD DE BARCELONA**

### **12.1 Introducción**

La ciudad de Barcelona está ubicada en un llano conformado por las estribaciones de la sierra de Collserola y el mar, y limitada por las desembocaduras de los ríos Besós y Llobregat. Sobre ese mismo llano y los valles de esos ríos, existen algo más de una veintena de municipios cuya trama urbana es continuidad de la de la ciudad; con ella conforman algunas agrupaciones de administración metropolitana en temas específicos como el transporte, el medio ambiente y los residuos, y una financiación de servicios urbanísticos. La organización de las redes de transporte se ha desarrollado según la propia lógica de la morfología del territorio; los accesos por carretera y ferrocarril a la ciudad de Barcelona siguen un esquema radial a lo largo de los corredores de la costa y de los valles fluviales citados. Hasta los años setenta no comenzaron a cerrarse esas redes con algún eje transversal periférico, y hasta la época olímpica no se construye el anillo perimetral de la ciudad y los túneles que permiten superar la barrera de las sierras perimetrales y costeras. La red ferroviaria (con la salvedad del ramal de conexión de 30 Km construidos en 1972 detrás de la sierra de Collserola) es prácticamente la heredera del siglo XIX, y hay que destacar que un porcentaje de casi el 50% de las vías básicas de acceso ha sido financiado mediante peajes, la mayoría aún vigentes. En los últimos años se han comenzado a producir transformaciones en el modelo de la ciudad metropolitana de Barcelona, que apuntan hacia la quiebra de la ciudad polinucleada, equilibrada y con un cierto grado de compacidad en sus asentamientos urbanos, que constituía el modelo referencial por el cual se ha sustentado el planeamiento urbanístico desde 1970; además el incremento generalizado de accesibilidad, asociado a un fuerte ritmo de ocupación del suelo, comienzan a generar nuevos espacios de marginalidad geográfica y social, en los que la conectividad a las redes y el coste de esta conectividad toman un relevante papel (Hormigo, J.P., 2006).

En este contexto se plantea el nuevo modelo de peaje urbano para Barcelona, que pretende mejorar la movilidad en la ciudad, con un peaje basado en la distancia y proponiendo una red vial urbana segregada según niveles de calidad. Con la ayuda de herramientas informáticas estimaremos los efectos que generaría su aplicación en la ciudad de Barcelona desde un punto de vista de los ahorros de tiempos de viajes y de la reducción del tráfico. Las simulaciones de tráfico han podido llevarse a cabo gracias a un acuerdo de colaboración firmado entre la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) y la Agencia de Ecología Urbana de Barcelona, actualmente denominada BCN Ecologia. BCN Ecologia nos ha proporcionado las matrices O-D de privados del área metropolitana de Barcelona, así como un modelo de tráfico de Barcelona en Transcad, calibrado a la situación real de tráfico de la ciudad.

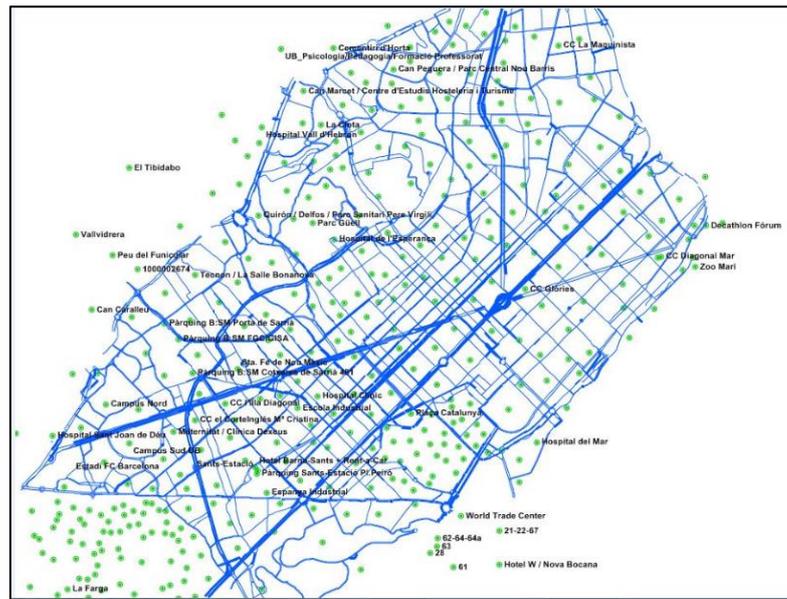


Figura 81. Red básica de peaje urbano en Barcelona simulada con Transcad.

El grafo de las vías de transporte de Barcelona se construye con el software informático especializado Transcad v.6, que permite representar matemáticamente y de forma simplificada los patrones de viaje, modos de transporte y rutas utilizadas, es la base del modelo para simular la movilidad actual de la ciudad. Para cada arco se introducen los correspondientes atributos (flujos actuales diferenciados por tipos de vehículos, velocidad y tiempo en flujo libre, capacidad) para cada sentido. La cantidad de viajes atraídos y generados provienen de la Encuesta de Movilidad Cotidiana realizada por la Autoridad de Transporte Metropolitano de Barcelona. La matriz de viajes contiene el número de vehículos que se desplazan desde una zona de origen  $i$  hasta una zona de destino  $j$ .

Una vez modelado el escenario actual ya será posible estimar el impacto que tendrá introducir diferentes tarifas de peaje en la ciudad. El objetivo principal será determinar cuál es la tarifa que puede producir una reducción en la cantidad de veh-km de vehículos privados que suponga un impacto sobre la congestión y la polución en la ciudad capaz de llevarla a cumplir con la normativa medioambiental europea. El argumento para que se acepte la implantación del peaje urbano es que permita disminuir el número de viajes o de veh-km equivalentes en automóvil y, por ende, la congestión, de manera que los viajeros actuales que continúen utilizando el automóvil perciban una mejora de la calidad del servicio, sobre todo aquellos que están dispuestos a asumir el desembolso adicional que representa el peaje, y que los demás tengan opciones aceptables, ya sea con trayectos alternativos más lentos o, preferiblemente, utilizando el transporte colectivo u otros modos menos generadores de externalidades.

Por otro lado, cabe indicar que el modelo de peaje urbano que se plantea podría complementar el modelo urbanístico de “supermanzanas”, que supone un aumento considerable del espacio público en Barcelona y exige que disminuya substancialmente el tráfico rodado en la ciudad. Esta reducción sólo puede lograrse con inversiones importantes en transporte público para permitir el trasvase de usuarios del vehículo privado.

La recaudación del nuevo sistema de peaje urbano debería idealmente ser suficiente para cubrir esos gastos además de los costes derivados de la inversión y el mantenimiento del sistema. La experiencia en ciudades como Londres o Estocolmo, que aplican sistemas de peaje urbano, indica que esta ecuación financiera es factible.

## **12.2 Conclusiones sobre la movilidad en Barcelona y la necesidad de un peaje urbano**

Para el desarrollo del presente trabajo, nos hemos apoyado en los datos de movilidad, que se presentan en el anejo B, basados en encuestas realizadas sobre la movilidad en día laborable de la población (de 16 años o más) residentes dentro del ámbito del sistema tarifario integral (STI) del área de Barcelona en el año 2016. Estas encuestas han sido publicadas por la «Autoritat del Transport Metropolità» que es un consorcio interadministrativo de carácter voluntario formado por administraciones consorciadas: Generalitat de Catalunya (51%) y administraciones locales (49%) «Àrea Metropolitana de Barcelona (AMB)», «Ajuntament de Barcelona» y «Associació de Municipis per la Mobilitat i el Transport Urbà (AMTU)».

De la información disponible se pueden extraer ciertas conclusiones sobre la movilidad en Barcelona. La ciudad de Barcelona recibe y/o emite cada día 6,1 millones de desplazamientos de las personas residentes dentro del Sistema de Transporte Integrado (STI). Un 68,7% de estos desplazamientos son internos en la ciudad (4,2 millones) y el 31% (1,91 millones) son de conexión. Casi la totalidad de los flujos internos (origen y destino Barcelona) son realizados por los residentes de la ciudad (95,5%). En los flujos de conexión, son las personas residentes en el resto del STI las que hacen la mayoría de estos desplazamientos (70,9%), mientras que los barceloneses hacen el 29,1% restante.

Para el caso concreto de la ciudad de Barcelona, la mayoría de los desplazamientos de las personas residentes de la ciudad (un 65,5%) se hace por motivos personales mientras que el 34,5% restante se debe a cuestiones laborales. Por el contrario, en los flujos de conexión, son los desplazamientos por motivos ocupacionales los que tienen un mayor peso (60,8%) frente al 39,2% de los desplazamientos por motivos personales.

La movilidad no motorizada representa el (36,8%) de los desplazamientos, de los cuales el (34 %) se realiza a pie y el (2,8%) restante en bicicleta. Aunque las proporciones son similares, se observa que las mujeres caminan más y los hombres van más en bicicleta.

En cuanto al transporte público, es usado por un (37,9%) de los barceloneses superando el uso del vehículo privado (25,3%). Dentro del transporte público el más usado es el metro (con un 15,4%) seguido del autobús (con un 11,5%). El transporte público es usado en mayor medida entre la población entre 16 y 29 años, mientras que la gente mayor se mueve mayoritariamente a pie.

En lo que se refiere al total del transporte privado (25,3%), un (15%) corresponde a desplazamientos en coche como conductor, un (2,5%) en coche como acompañante, (7,3%) en moto y un (0,5%) en

furgoneta/camioneta. Es importante señalar que, como mucho, un 15% de los automóviles va con más de un ocupante. El posible impacto del peaje en el índice de ocupación de los vehículos es un aspecto que convendrá analizar en detalle si se plantea la aplicación práctica de esta medida.

Con relación a la distribución horaria de los desplazamientos, se registra una punta horaria de 8:00 a 9:00 horas de la mañana y un periodo de máxima concentración por la tarde, entre las 17:00 y las 20:00 horas (este periodo coincide con las salidas del trabajo y de la escuela y también con el horario de uso de buena parte de los servicios y comercios).

Si analizamos los modos de transporte según tipos de recorridos, tanto para los desplazamientos internos en Barcelona (4,2 millones) como para los desplazamientos de conexión con Barcelona (1,91 millones), vemos que en la movilidad interna de Barcelona los modos no motorizados y el transporte público son los más utilizados para realizar desplazamientos en día laborable por el interior de Barcelona (85,5% de los desplazamientos internos de la ciudad); mientras que en la movilidad de conexión los modos de transporte motorizados son los más utilizados en casi todas las conexiones con Barcelona (96,6%, de los cuales 49,8% lo hacen en transporte público y un 46,8% en transporte privado). Esto quiere decir que, dentro Barcelona, los problemas de saturación de la red son debidos, en gran medida, a los 893.000 vehículos privados de conexión que entran en Barcelona, que se añaden a los 635.000 vehículos privados internos de Barcelona.

Barcelona ha impuesto en los últimos años una serie de medidas para reducir la congestión del tráfico en la ciudad que no han conseguido su reducción drástica. El porcentaje de viajes en vehículo privado (internos más de conexión) prácticamente no ha variado entre 2005 (25,9%) y 2016 (25,3%), pero acumula más de tres años de subida. Esta tendencia podría continuar, aunque en 2020 no podrán circular los coches que más polucionen. No es evidente que ello baste para reducir el tráfico. Varios estudios apuntan a que tan sólo el peaje urbano podrá contribuir de una manera significativa a la reducción de la congestión en Barcelona.

### **12.3 Diseño de la red de peaje urbano en Barcelona**

Como se ha explicado anteriormente, la propuesta de diseño de la red básica de peaje urbano en Barcelona respetaría el modelo urbanístico de “supermanzana” impulsado durante los últimos años por el Ayuntamiento de Barcelona. La configuración geométrica más habitual de las supermanzanas consiste en una célula urbana equivalente a nueve manzanas del actual Ensanche de Barcelona. Esta nueva célula urbana, que estructuraría la ciudad en una red viaria básica en forma de cuadrícula de como máximo 450 metros de lado, vertebraría la red de peaje urbano propuesta en este trabajo. Por su parte, la red de transporte local restante se plantearía como una red gratuita con una velocidad de circulación muy restringida y sin una coordinación semafórica preferente eliminando las ondas verdes, que se reservarían a la red básica. Esta propuesta de movilidad para la ciudad de Barcelona, generaría una nueva situación para el vehículo privado. Los viajeros tendrían la alternativa de utilizar su vehículo privado y poder pagar para ir más rápido;

emplear más tiempo en sus desplazamientos a través de la red secundaria gratuita o cambiar a modos de transportes alternativos como el metro, tranvía, autobús o bicicleta.



**Figura 82. Propuesta de red básica para el peaje urbano en Barcelona.**

El principal objetivo del concepto de pago por uso de la red vial básica propuesto para Barcelona es reducir sensiblemente el tráfico de vehículos privados y, por ende, la contaminación. El impacto dependería, lógicamente, de la tarifa aplicada. En el presente estudio se plantean varios escenarios, con distintas tarifas, para tratar de reducir los niveles actuales de contaminación atmosférica y poder cumplir con los máximos marcados por la Unión Europea.

La propuesta de ordenación del tráfico utilizada, a diferencia de la que actualmente se prevé para las “supermanzanas”, implica que el movimiento en el interior de la supermanzana no estaría tan restringido al tráfico permitiéndose la circulación, pero con una velocidad muy limitada. Estos viales interiores libres de peaje se podrían regular como las actuales “zonas 30”<sup>96</sup> de Barcelona, pero con una velocidad aún más restringida. Tal como se ha comentado, el peaje urbano propuesto llevaría implícita una nueva gestión de la regulación semafórica de la ciudad. La red básica de pago gozaría de mejores ondas verdes, alargando las fases de circulación, mientras que se acortarían en las vías secundarias gratuitas. Esta nueva regulación semafórica está fuera de los objetivos fundamentales del presente estudio y debería ser tratada en líneas de investigación futuras. Por otro lado, la red de autobuses sería rediseñada para encajar sus frecuencias y recorridos al nuevo diseño del tráfico urbano. Estos estudios de detalle no han sido realizados en el presente

---

<sup>96</sup> Las zonas 30 de Barcelona se implementaron como un compromiso que adoptó el Ayuntamiento de Barcelona, en el seno del pacto por la movilidad, para pacificar el tráfico en una gran parte de calles de la ciudad. Esta estrategia consiste en restringir la velocidad de los vehículos a 30 km/h, lo cual significa que los ciclistas pueden circular por la calzada de manera segura. Además, esas zonas evitan que se usen calles secundarias de atajos a los que se recurren para esquivar el mayor volumen de tráfico que suele haber en las vías principales, lo que implica una menor accidentalidad. La primera prueba piloto tuvo lugar en 2016 aplicándose en 16 km de calle. Actualmente existen más de 320 km de calles pacificadas con zonas 30.

trabajo, que ha adoptado criterios genéricos sobre velocidades de circulación en los distintos viales y ha utilizado el diseño actual de la red semafórica y de autobuses en Barcelona.

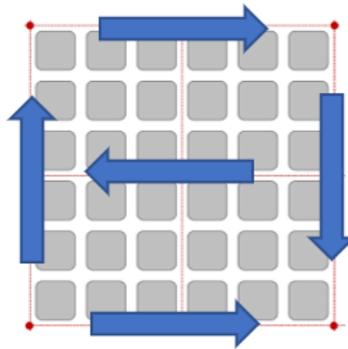


Figura 83. Red viaria rápida de peaje. Fuente: Elaboración propia.

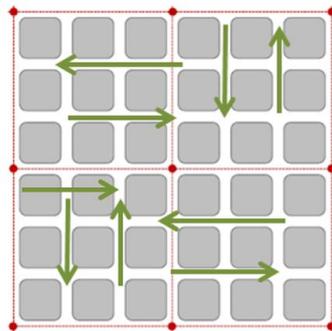


Figura 84. Red viaria lenta gratuita. Fuente: Elaboración propia.

## 12.4 Centro de control de tráfico

Todos los nuevos sistemas de tráfico planteados serían gobernados desde un centro de control de tráfico Urbano. En este centro de control nos encontraríamos con una sala principal presidida por un “videowall” más una serie de puestos de operación. En la sala técnica se ubicarían los servidores, el equipamiento de comunicaciones y el SAI (sistema de alimentación ininterrumpida).

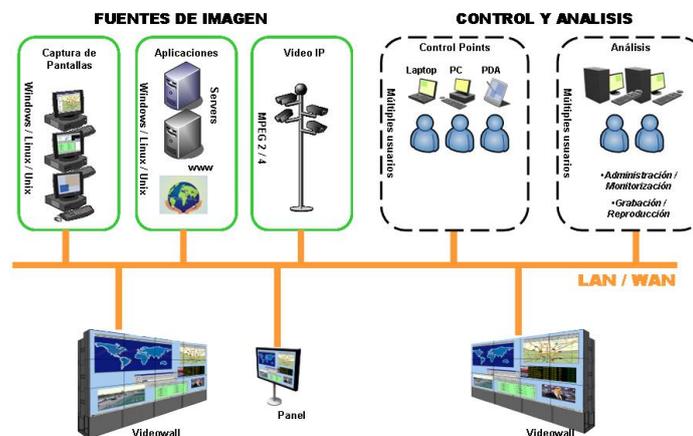


Figura 85. Esquema de funcionamiento del software de visualización. Fuente: ACISA.

Este nuevo centro de control podría estar integrado dentro del actual Centro de Control de Tráfico Urbano del Ayuntamiento de Barcelona con aplicaciones específicas que dan servicio a otros sistemas como:

- Comunicación y monitorización de equipos.
- Sistema de control de tráfico, encargado de monitorizar el estado de funcionamiento de los reguladores semafóricos, detectores de tráfico y cámaras de visualización de tráfico. Desde este sistema también se controlarían sobre los reguladores los corredores de bomberos, sistema de preferencia de autobuses, carril Bus-VAO, ...
- Sistema de gestión de la información pública, encargado de gestionar los detectores de tráfico y publicación de datos a través de paneles o webs.
- Sistema de gestión de video, encargado de gestionar las imágenes de las cámaras de video para la supervisión del tráfico.
- Sistema de gestión de incidencias, encargados de gestionar los avisos de incidencias generadas.
- Sistema de gestión de zonas de acceso regulados, encargados para controlar en acceso a determinadas calles o zonas.
- Sistema de control de carriles reversibles de la Avenida Diagonal.
- Sistema de gestión de incidencias, encargado de tratar los avisos de incidencias.

Otro punto a destacar es la interconexión de este nuevo centro de control con otros sistemas remotos como:

- La sala conjunta de mando de Barcelona donde se ubica personal Guardia Urbana, Mossos d'Esquadra, Bomberos y Servicios de Emergencias Médicas (SEM) gestionando de manera conjunta las incidencias y emergencias policiales que surgen diariamente en la ciudad. En esta sala debería estar replicado el centro de control de tráfico urbano con el equipamiento necesario para poder trasladar en caso de emergencia sus principales funciones.
- El centro de control de Rondas cuya finalidad es proporcionar la señal de las cámaras de supervisión de tráfico de las rondas, así como información de detectores de tráfico.
- El centro de información viaria de Catalunya (CIVICAT) encargada de proporcionar información del carril Bus-VAO de la C-58 por tal de que el centro de control de tráfico urbano pueda adaptar de manera automática la regulación semafórica de los cruces de la zona al estado de funcionamiento del carril.
- El centro de control de autobuses TMB con capacidad para ver las cámaras de supervisión del tráfico recibidas del centro de control de tráfico urbano.

## **12.5 Política de incentivos y descuentos**

La instalación del dispositivo embarcado “H-Mobility” en los vehículos que circulen por la ciudad de Barcelona proporcionaría al Ayuntamiento información detallada del comportamiento de los diferentes conductores. Con toda esta información el Ayuntamiento podría realizar actuaciones tendentes a premiar a

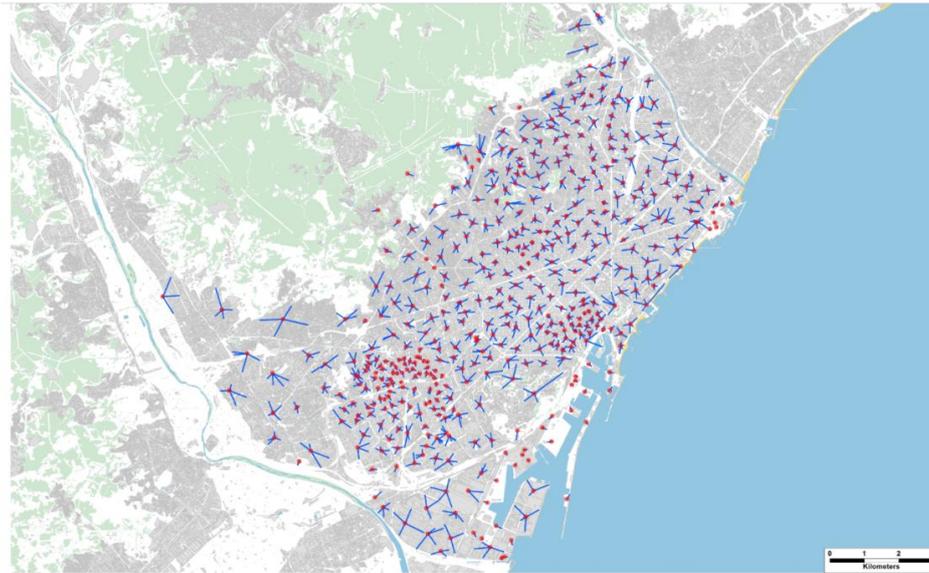
los mejores conductores, pero también operaciones de marketing para informar de los servicios de transporte alternativos a los viajes repetitivos y, en todo caso, utilizar los datos para mejorar la planificación y gestión de la movilidad.

Por otro lado, siguiendo con el ejemplo de otras ciudades, se podrían establecer exenciones o reducciones de la tasa por congestión a los vehículos menos contaminantes o que prestaran algún tipo de servicio público. No parece oportuno, sin embargo, eximir de esta tasa a taxis o camiones de reparto ya que el objetivo es, precisamente, reducir su uso o que se pague por la mejora de las condiciones de velocidad que se ofrecen. Por otra parte, no debería haber una discriminación en función de categorías personales (residentes, minusválidos, etc.) porque no parecen tener ninguna justificación y tienen la opción de utilizar vías secundarias.

## **12.6 Modelo de tráfico del nuevo sistema de peaje urbano en Barcelona**

El fundamento del modelo ya ha sido explicado en capítulos anteriores donde se ha expuesto la aplicación, para reproducir adecuadamente la movilidad en vehículo privado, de un modelo de transporte clásico de 4 etapas. La última fase del modelo de demanda es la que permite analizar el comportamiento en la red de los usuarios del vehículo privado tras la introducción de una tarifa de “congestión” urbana. El problema que se atacará será la minimización de los tiempos de viajes y el aseguramiento de la calidad del servicio en las nuevas vialidades rápidas planteadas. Los viajeros en automóvil, confrontados a un pago adicional, podrán optar por utilizar la red básica, más rápida que antes, o añadirse a los usuarios de la red secundaria, más lenta pero gratuita o buscar opciones alternativas. El modelo de asignación, calibrado para la situación actual, nos permitirá estimar qué transformación de la movilidad se puede esperar.

Tal como ya se ha comentado, para la aplicación del modelo se ha contado con el apoyo de BCN Ecología y se ha empleado su zonificación básica, identificada a través de los correspondientes centroides. Éstos se conectan a la red de transporte mediante los llamados conectores (centroid connectors), los cuales no son vías físicas, sino arcos del grafo del sistema que representan la accesibilidad a la red de transporte de la zona representada por el centroide y, por tanto, son los canales que utiliza el sistema para incorporar los viajes que esta zona genera y atrae. La Figura 86 muestra los centroides y conectores del modelo de tráfico:



**Figura 86. Centroides y conectores del modelo de tráfico de Barcelona en Transcad.**

Como se puede apreciar en la figura, cada una de las zonas se ha conectado al viario urbano mediante más de un arco (radio o conector). Esto hace que el árbol de decisión de caminos mínimos incorpore, además de la elección de rutas óptimas a través del propio viario, la elección del radio o conector que se hará servir para llegar a la red viaria. Además, el modelo está construido de manera que obliga a los viajes de los usuarios a acceder a la red en condiciones de congestión para repartir mejor los volúmenes de tráfico en origen y destino (cerca de los centroides). Indicar que, como ya se ha dicho en capítulos anteriores, para garantizar una mejor consistencia y convergencia del modelo a la hora de comparar escenarios, se ha resuelto el problema de asignación mediante el método de equilibrio del usuario (UE).

En este trabajo no pretendemos averiguar el mejor esquema tarifario para el peaje propuesto porque este punto debería ser objeto de otro estudio particular, ya que las variables que seguramente se incorporarían al esquema (en función del tipo de vehículo, horario/calendario u otras variables) se definirían probablemente a partir de un consenso político. Por ello, en este estudio, que sólo pretende plantear el esquema básico y sus posibles consecuencias, simplemente adoptaremos una tarifa kilométrica única, que se aplica a toda la red viaria básica de Barcelona. En todo caso la tarifa debe ser suficiente para conseguir el objetivo de reducir sustancialmente la congestión y la contaminación actual de la ciudad y para lograr, como mínimo, el equilibrio financiero del sistema.

Se han hecho simulaciones con el modelo usando distintos valores para la tarifa fija kilométrica, independientemente de otras variables. Se han buscado los que, según los resultados del modelo, permitían reducir el tráfico un 13% (equivalente a lo que BCNEcología ha estimado que se conseguiría con la aplicación del modelo urbanístico de supermanzanas) y un 21% (reducción del tráfico que se considera necesaria para que la ciudad de Barcelona cumpla con los compromisos adquiridos con la Unión Europea). Adicionalmente se ha realizado una simulación con una tarifa superior, que permita una reducción del 30%, para poder analizar el impacto de las distintas tarifas.

El escenario base del modelo de tráfico parte de un grafo que refleja adecuadamente la situación actual de la oferta viaria urbana. A partir de la matriz O/D y utilizando el modelo de asignación que, como se ha indicado, no implementa una distribución entre modos de transporte, se estiman las intensidades de tráfico de cada arco de la red. El procedimiento de calibración permite ir definiendo los parámetros del modelo para que las cargas que proporciona coincidan suficientemente bien con los aforos disponibles. Los parámetros así obtenidos para el escenario actual se utilizan para estimar los efectos de las intervenciones que puedan plantearse y, en nuestro caso, de la aplicación de diversas estrategias tarifarias (escenario futuro).

La susceptibilidad del tráfico urbano a la implementación de un determinado esquema tarifario se estima a través de varios indicadores que reflejan criterios de operación (reducción del número de viajes o de kilómetros recorridos, velocidades medias, etc.) y el resultado se puede evaluar con criterios económicos y financieros (coste generalizado, ingresos, pago medio por viaje, etc.)

La matriz OD empleada cuenta con más de 2,8 millones de desplazamientos diarios en modos motorizados privados, incluyendo viajes internos en Barcelona y de conexión con Barcelona (ver Figura 86). En la siguiente figura se muestra esquema de los viajes dentro del área modelizada para el escenario base:

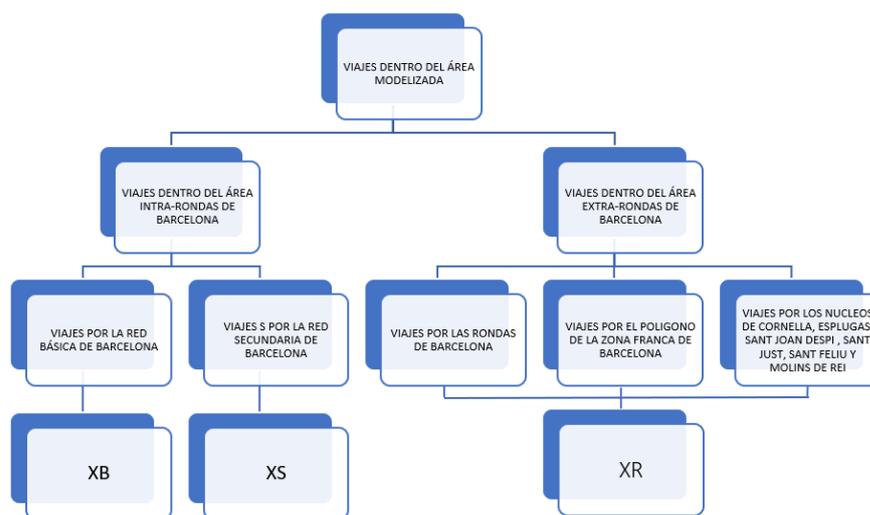


Figura 87. Esquema de viajes dentro del área modelizada para el escenario base. Fuente: elaboración propia

El problema de equilibrio de red se resuelve mediante un algoritmo, implementado en Transcad, que permite una precisión razonable y una convergencia rápida con resultados estables. La red encontrará el equilibrio cuando todos los viajes son asignados a rutas con una impedancia mínima (p.ej. tiempo de viaje, coste del viaje o combinación de ambos usando valores del tiempo de viaje) entre cada par OD de manera que ningún viajero puede mejorar su impedancia cambiando a una ruta alternativa. El método de asignación se basa en dos supuestos:

- Los viajeros tienen información perfecta de las condiciones en todas las rutas.

- Los viajeros siempre hacen una elección de ruta racional para minimizar el coste generalizado del viaje.

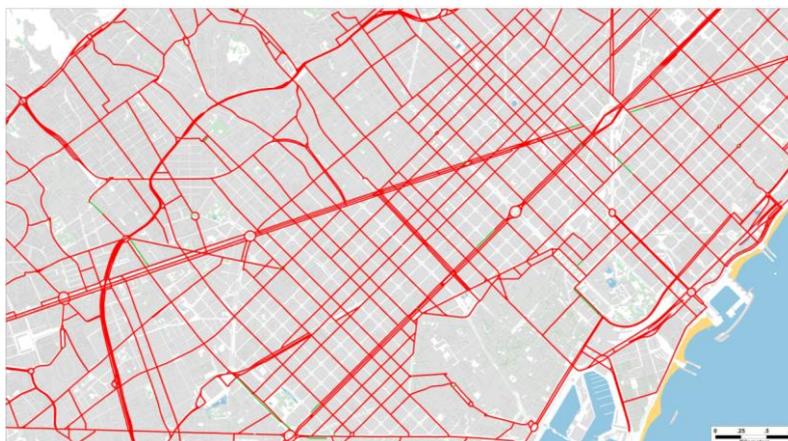


Figura 88. Detalle de la red de vías básicas del peaje urbano en Barcelona.

Para la asignación del tráfico, hemos segregado previamente la matriz de viajes de vehículos privados en función de los distintos motivos de desplazamientos, según datos de la encuesta “EMEF 2016” (ver Tabla 35). Para los valores del tiempo de viaje nos hemos apoyado en el estudio realizado por la “Autoritat del Transport Metropolità de Barcelona” para TRAM<sup>97</sup> (ver Tabla 36) en el año 2006.

### LA MOBILITAT DE LES PERSONES RESIDENTS A BARCELONA A. Motiu de desplaçament i mode de transport

- Els barcelonins i barcelonines quan es desplacen per motius de treball i estudis i les respectives tornades a casa ho fan principalment amb transport públic. Quan el desplaçament és per motius personals predomina l'anar a peu. El transport privat té menys incidència en aquest tipus de desplaçaments que els que són per treball i estudis.

Mode de transport	Motiu de desplaçament				Total	
	Mobilitat ocupacional	Mobilitat personal	Tornada a casa ocupacional	Tornada a casa personal		
Desplaçaments	Modes no motoritzats	251.262	954.616	202.071	753.988	2.161.936
	Transport públic	423.263	423.026	325.351	344.318	1.515.958
	Transport privat	301.764	219.672	240.988	175.924	938.347
	<b>Total</b>	<b>976.288</b>	<b>1.597.314</b>	<b>768.410</b>	<b>1.274.230</b>	<b>4.616.241</b>
% columna	Modes no motoritzats	25,7%	59,8%	26,3%	59,2%	46,8%
	Transport públic	43,4%	26,5%	42,3%	27,0%	32,8%
	Transport privat	30,9%	13,8%	31,4%	13,8%	20,3%
	<b>Total</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>
% fila	Modes no motoritzats	11,6%	44,2%	9,3%	34,9%	100,0%
	Transport públic	27,9%	27,9%	21,5%	22,7%	100,0%
	Transport privat	32,2%	23,4%	25,7%	18,7%	100,0%
	<b>Total</b>	<b>21,1%</b>	<b>34,6%</b>	<b>16,6%</b>	<b>27,6%</b>	<b>100,0%</b>

Tabla 35. Motivo de desplazamiento según modo de transporte en Barcelona. Fuente: EMEF 2016

97 TRAM es una empresa concesionaria de la Autoridad del Transporte Metropolitano de Barcelona (ATM) de transporte público que gestiona las dos redes actuales de tranvías en la Región Metropolitana de Barcelona.



Tabla 36. Valor del tiempo en base a encuestas de tramo entre usuarios de Trambaix y Trambesós 2009. Fuente: Autoritat del Transport Metropolità de Barcelona.

Mostramos a continuación los valores de tiempo de viaje utilizados de las matrices segregadas:

- OD privados movilidad ocupacional (32,2%) con un valor del tiempo de 15,7 €/h.
- OD privados vuelta a casa ocupacional (25,7%) con un valor del tiempo de 10,7 €/h.
- OD privados movilidad personal y vuelta a casa movilidad personal (42,1%) con un valor del tiempo de 7,3 €/h.

La aplicación del peaje urbano en Barcelona provocará una redistribución de los viajes en vehículos privado con respecto al escenario base. A continuación, se muestra esquema de la distribución de esos viajes en la nueva situación.

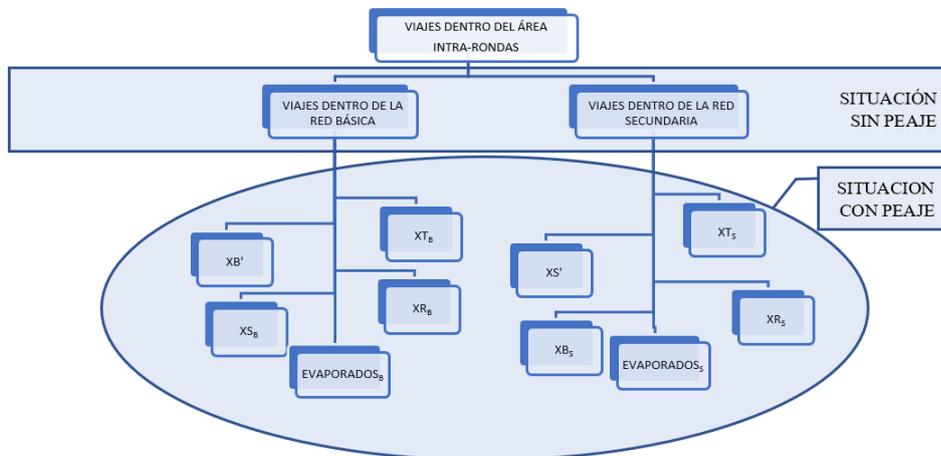


Figura 89. Distribución de viajes en el área de intra-rondas antes y después del peaje. Fuente: elaboración propia

Donde:

- XB': son viajes que permanecen en la red básica después el peaje (los que pagan y los exentos).
- XS<sub>B</sub>: son viajes que proceden de la red básica y que se han desviado a la a red secundaria.
- XR<sub>B</sub>: son viajes que proceden de la red básica y que se han desplazado fuera del área intra-rondas después del peaje.

- $XT_B$ : Son viajes que proceden de la red básica y que se han transferido a modos alternativos de transporte (transporte público, a pie, bicicleta).
- Evaporados: son viajes de la red básica que se dejan de hacer.
- $XS'$ : son viajes que permanecen en la red secundaria después del peaje.
- $XB_S$ : son viajes procedentes de la red secundaria que utilizan la red básica después de aplicar el peaje.
- $XR_S$ : son viajes procedentes de la red secundaria que se han desplazado fuera del área intra-rondas después del peaje.
- $XT_S$ : son viajes que proceden de la red secundaria y que se han transferido a modos alternativos de transporte (transporte público, a pie, bicicleta).
- Evaporados<sub>B</sub>: viajes de la red básica que se dejan de hacer.
- Evaporados<sub>S</sub>: viajes de la red secundaria que se dejan de hacer.

Es decir, podemos decir que tras la aplicación del peaje urbano la situación final de viajes quedaría como se muestra en la siguiente figura (el subíndice “F” indica situación final):

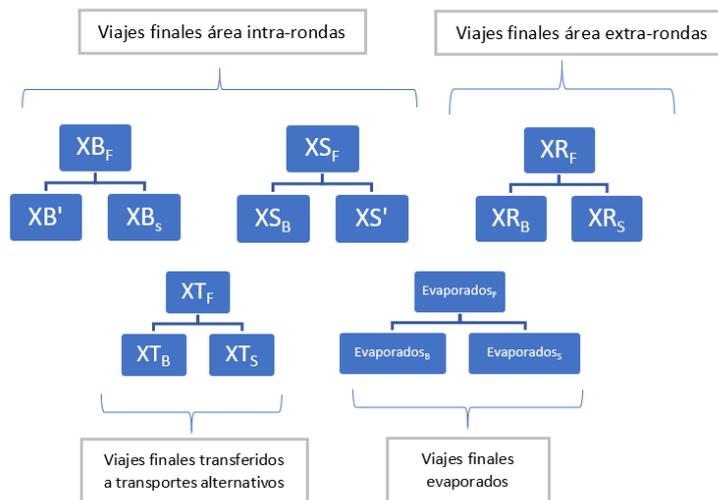


Figura 90. Situación final de viajes tras la aplicación del peaje urbano. Fuente: elaboración propia.

## 12.7 Escenarios y resultados del modelo de tráfico

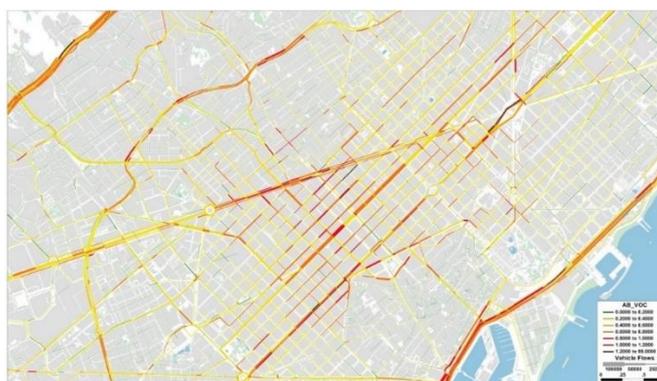
El ámbito de estudio incluye una superficie de análisis más allá de las rondas de la ciudad de Barcelona (ver Figura 86). La situación actual del tráfico en este ámbito, tal como se ha comentado, queda representada aplicando la matriz origen-destino de más de 2,8 millones de vehículos equivalentes que representan los desplazamientos de ida y vuelta en vehículo privado al grafo de la red viaria y calibrado el modelo de asignación con la información de las intensidades de tráfico en las distintas secciones de la red donde se dispone de aforos. El modelo de asignación se ha aplicado a la red con distintas tarifas de peaje sobre la red básica, con el objetivo de analizar el comportamiento de la demanda de tráfico dentro del área intra-rondas

(rondas excluidas). Posteriormente, siguiendo la metodología que se ha adoptado para analizar el impacto de la medida, se aplica un modelo simple de reparto modal para estimar el número final de viajes que, o bien, se desviarían a la red secundaria o pasarían a modos de transporte público. A continuación, mostramos los datos más relevantes de los diversos escenarios dentro del ámbito intra-rondas, tanto para la red de transporte básica como secundaria.

**A) Escenario base, sin peaje**

	Red básica. Situación Base (sin peaje)	Red secundaria. Situación Base (sin peaje)
<b>Tarifa peaje (cts/km)</b>	0	0
<b>Desplazamientos (*10<sup>6</sup>)</b>	1,4	0,3
<b>Veh-km (*10<sup>6</sup>)</b>	12,5	2,7
<b>Vm (km/h)</b>	26,2	22,8

**Tabla 37. Datos básicos del escenario base de tráfico de la ciudad de Barcelona.**



**Figura 91. Gráfico con la situación base de la ciudad de Barcelona simulado con Transcad v.6.**

**B) Escenario de peaje urbano con tarifa de 9 cts/km**

En este escenario hemos introducido una condición externa, la aplicación de una tarifa de peaje de 9 cts/km a toda la red básica de transporte de la ciudad de Barcelona. Como se podía esperar, la aplicación de esta tarifa provoca un trasvase de viajes desde la red básica hacia la red secundaria, así como hacia ámbitos fuera del área intra-rondas de la ciudad. En la tabla Tabla 38 y en la Tabla 39 se muestra un resumen de los resultados obtenidos para la red básica y secundaria, respectivamente.

- **Red básica**

Resultados en la red básica de Barcelona tras simular un escenario de peaje de 9 cts/km en dicha red (ámbito municipio de Barcelona-área intra-rondas (sin incluir rondas))				
	Situación base (sin peaje)	Situación peaje	Variación respecto a la situación base	Variación (%)
Tarifa peaje (€/km)	0	0,09		
Veh-km (*10 <sup>6</sup> )	12,5	10,8	-1,6	-13%
Vm (km/h)	26,2	32,5	6,3	24%

Tabla 38. Resultados obtenidos en la red básica de transporte tras simular un escenario de peaje de 9 cts/km.

Tras aplicar esta estrategia tarifaria, se observa que la velocidad de circulación media en las vías básicas pasaría de 26 km/h a más de 32 km/h, lo que representaría una reducción substancial del tiempo de viaje. Por otro lado, se conseguiría en esta red una disminución del 13% de los vehículos-kilómetros en transporte privado (ver Figura 92).

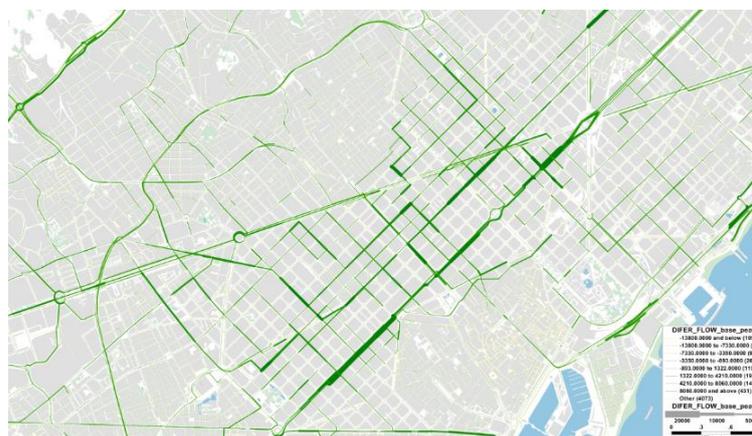


Figura 92. Diagrama de las pérdidas de tráfico tras la aplicación del peaje de 9 cts/km en la ciudad de Barcelona. En verde las calles que pierden tráfico.

- **Red secundaria**

Resultados en la red secundaria de Barcelona tras simular un escenario de peaje de 9 cts/km en la red básica (ámbito municipio de Barcelona-área intra-rondas (sin incluir rondas))				
	Situación base (sin peaje)	Situación peaje	Variación respecto a la situación base	Variación (%)
Tarifa peaje (€/km)	0	0,09		
Veh-km (*10 <sup>6</sup> )	2,8	3,8	1,1	38%
Vm (km/h)	22,8	19,4	-3,4	-15%

Tabla 39. Resultados obtenidos en la red secundaria tras simular un escenario de peaje en la red básica de 9 cts/km.

Los desplazamientos que se dejan de hacer en la red básica por la aplicación del peaje pasarían pues hacia la red secundaria, gratuita, o a itinerarios externos a la zona intra-rondas. En esta fase (asignación a la red) no se prevé que disminuyan los viajes en automóvil, solo que se reparten sobre la red de forma distinta para

optimizar los tiempos (o costes generalizados) totales. La red secundaria, según el modelo, no absorbería más que alrededor de 2/3 de los vehículos que abandonarían la red básica. Nótese que el consiguiente aumento inicial del 38% en el número de vehículos-kilómetros en las vías secundarias provoca una reducción del 15% en la velocidad media de circulación en ellas. A pesar del aumento de tráfico no se aprecian puntos significativos de saturación en la red (ver Figura 94). En todo caso, no parece que el desvío de automóviles a calles tranquilas sea políticamente aceptable, de manera que parece lógico actuar para mantener, como mucho, el tráfico actual, lo que llevaría a actuaciones para reducir la capacidad y recuperar espacio público (aceras, carriles bici, etc.) y aumentar los tiempos de viaje en la red secundaria. La implantación de las supermanzanas sería una fórmula evidente de actuación en este sentido.

Tal como se ha indicado en la metodología, el incremento en el tiempo de viajes dentro de la red secundaria debería conllevar una transferencia hacia modos de transporte alternativos más aceptables (transporte colectivo, bicicletas, a pie, etc.) que se estiman en la fase siguiente de la aplicación del modelo.

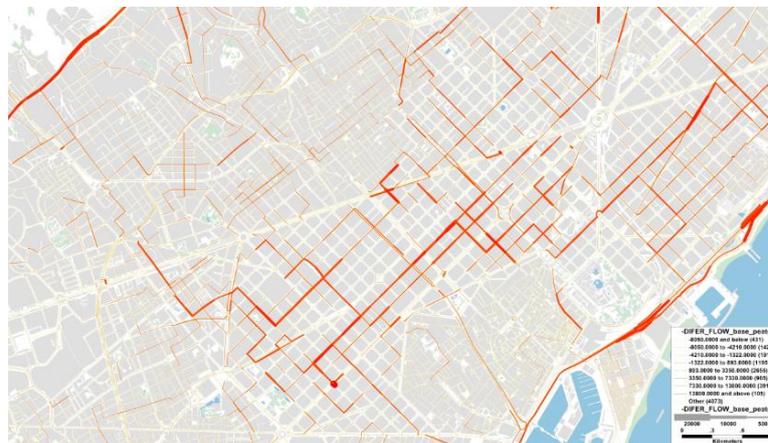


Figura 93. Diagrama de las ganancias de tráfico tras la aplicación del peaje de 9 cts/km en la ciudad de Barcelona. En rojo las calles que pierden tráfico.

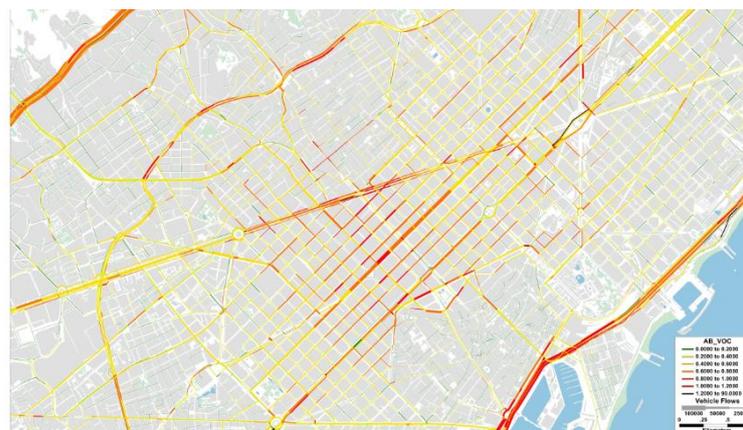


Figura 94. Diagrama de tráfico después de la aplicación del peaje 9 cts/km en la ciudad de Barcelona.

### C) Escenario de peaje urbano con tarifa de 16 cts/km

En este caso, se aplica una tarifa de peaje de 16 cts/km a la red viaria básica de Barcelona. En las Tabla 40 y Tabla 39 se muestran, resumidos, los resultados obtenidos para la red básica y la secundaria, respectivamente:

#### - *Red básica*

<b>Resultados en la red básica de Barcelona tras simular un escenario de peaje de 16 cts/km en dicha red (ámbito municipio de Barcelona-área intra-rondas (sin incluir rondas))</b>				
	<b>Situación base (sin peaje)</b>	<b>Situación peaje</b>	<b>Variación respecto a la situación base</b>	<b>Variación (%)</b>
<b>Tarifa peaje (€/km)</b>	0	0,16		
<b>Veh-km (*10<sup>6</sup>)</b>	12,5	9,8	-2,6	-21%
<b>Vm (km/h)</b>	26,2	36,3	10,1	39%

**Tabla 40. Resultados obtenidos en la red básica de transporte tras simular un escenario de peaje de 16 cts/km.**

Con este escenario la velocidad de circulación media en la red básica de la ciudad pasaría de los 26 km/h a algo más de 36 km/h, es decir, un aumento de un 39% con respecto a la situación base. Observando los vehículos kilómetros vemos que disminuyen en un 21%. Esta disminución podría ser comparable a la obtenida en Londres durante el periodo (2002-2003) con una tarifa de entrada de 5 libras, o incluso a la de Estocolmo para el periodo (2005-2006) con una tasa máxima de 6€/día. Este tráfico se desplazaría hacia la red secundaria o, preferiblemente y tal como se ha propuesto antes, hacia otros modos de transporte alternativos.

#### - *Red secundaria*

Al igual que para el escenario anterior, aunque con un impacto mayor, la gratuidad de estas vías provocaría un trasvase de vehículos desde la red básica hacia la red secundaria. En este caso, como refleja la Tabla 41, aplicando el modelo de asignación, que sólo contempla la redistribución sobre la red de los vehículos que la usaban, se produciría un aumento del 66% en el número de vehículos-kilómetros, que reduciría un 24% la velocidad media de circulación en la red. Como se puede observar en la Figura 95. este incremento de la tarifa de peaje, generaría problemas de saturación en algunas vías de la red secundaria que previsiblemente se irían progresivamente diluyendo por la reducción del tráfico. Efectivamente, la experiencia indica que muchos viajes se irían trasvasando hacia modos de transporte alternativos (transporte público, bicicleta, a pie, etc.) para mejorar sus costes generalizados de desplazamiento o simplemente no se llevarían a cabo. La aplicación del modelo de reparto modal nos permitirá estimar este trasvase.

Resultados en la red secundaria de Barcelona tras simular un escenario de peaje de 16 cts/km en la red básica (ámbito municipio de Barcelona-área intra-rondas (sin incluir rondas))				
	Situación base (sin peaje)	Situación peaje	Variación respecto a la situación base	Variación (%)
Tarifa peaje (€/km)	0	0,16		
Veh-km (*10 <sup>6</sup> )	2,8	4,6	1,8	66%
Vm (km/h)	22,8	17,3	-5,5	-24%

Tabla 41. Resultados obtenidos en la red secundaria tras simular un escenario de peaje en la red básica de 16 cts/km.

Dado el modesto porcentaje de viajes en vehículo privado de los habitantes de la ciudad, una reducción del tráfico tan elevada sólo podría alcanzarse reduciendo los desplazamientos de conexión en automóvil con el resto del área metropolitana, ya que de allí procede la mayor parte del tráfico interno de Barcelona. Para absorber los viajes que cambiarían de modo para estos desplazamientos desde la periferia, serían precisas actuaciones para reforzar el sistema de transporte público metropolitano que ciertamente exigirían inversiones cuantiosas que sería necesario financiar.

Es importante señalar que, según BCN Ecología, sólo si se mantuviera el tráfico actual en las vías secundarias se cumplirían los estándares mínimos de calidad del aire fijados por la Unión Europea. Al igual que en el escenario anterior, para potenciar aún más el cambio modal, aparte de mejoras en el servicio de transporte público, se podría actuar físicamente con la implantación de las supermanzanas en ciertas zonas de la ciudad (restringiendo la circulación en las vías secundarias) o reduciendo la capacidad de la red secundaria.



Figura 95. Diagrama de tráfico después de la aplicación del peaje 16 cts/km en la ciudad de Barcelona.

#### D) Escenario de peaje urbano con tarifa de 30 cts/km

Por último, se aplica una tarifa de peaje de 30 cts/km en la red básica de transporte de Barcelona. A continuación, se muestran tablas con un resumen de los resultados obtenidos para la red básica y secundaria.

<b>Resultados en la red básica de Barcelona tras simular un escenario de peaje de 30 cts/km en dicha red (ámbito municipio de Barcelona-área intra-rondas (sin incluir rondas))</b>				
	<b>Situación base (sin peaje)</b>	<b>Situación peaje</b>	<b>Variación respecto a la situación base</b>	<b>Variación (%)</b>
<b>Tarifa peaje (€/km)</b>	0	0,3		
<b>Veh-km (*10<sup>6</sup>)</b>	12,5	8,6	-3,8	-31%
<b>Vm (km/h)</b>	26,2	42	15,8	60%

Tabla 42. Resultados obtenidos en la red básica de transporte tras simular un escenario de peaje de 30 cts/km.

<b>Resultados en la red secundaria de Barcelona tras simular un escenario de peaje de 30 cts/km en la red básica (ámbito municipio de Barcelona-área intra-rondas (sin incluir rondas))</b>				
	<b>Situación base (sin peaje)</b>	<b>Situación peaje</b>	<b>Variación respecto a la situación base</b>	<b>Variación (%)</b>
<b>Tarifa peaje (€/km)</b>	0	0,3		
<b>Veh-km (*10<sup>6</sup>)</b>	2,8	5,4	2,6	92%
<b>Vm (km/h)</b>	22,8	9,8	-13,0	-57%

Tabla 43. Resultados obtenidos en la red secundaria tras simular un escenario de peaje en la red básica de 30 cts/km.

Un escenario tarifario de 30 cts/km, lograría reducciones importantes de tráfico en la red básica, del orden del 31%, pero en contrapartida reduciría mucho la velocidad de circulación en la red secundaria. Este hecho forzaría aún más al cambio modal. Si suponemos un viaje medio de ida y vuelta de 18 km, representaría pagar 5,4 euros por el desplazamiento. Es de esperar que una tarifa alta, perjudique sobre todo a aquellos viajeros cuyo valor del tiempo es menor. Para mantener el nivel de tráfico actual en la red secundaria habría que aplicar medidas todavía más radicales que en los casos anteriores. El desvío hacia modos alternativos sería mayor, con fuertes exigencias de adaptación al transporte colectivo.

## 12.8 Estimación del cambio modal tras la aplicación del peaje urbano

Se ha hecho referencia a que en nuestro modelo de asignación el número de vehículos equivalentes tras la aplicación del peaje permanece constante. Esto implica que el efecto producido en la red, tras la aplicación de una condición externa de peaje, es el de una redistribución de los volúmenes de tráfico entre la red básica, la red secundaria y las rondas. Para estimar cuántos de los desplazamientos que pasan a las vías secundarias finalmente se trasvasan al transporte público tenemos que recurrir a un modelo independiente que nos permita estimar este impacto. Partiremos de la hipótesis de que, una vez aplicado el peaje, serán susceptibles de cambiar de modo de transporte aquellos viajes que han pasado a incrementar el número de desplazamientos de la red secundaria. Esta hipótesis conservadora garantiza que el número de viajes en la red secundaria nunca será inferior a la inicial. El modelo a utilizar ha sido desarrollado en el capítulo 10.4.

Para la aplicación práctica del modelo, hemos calculado los tiempos de viaje, acceso y espera de algunos itinerarios aleatorios realizados en las vías secundarias afectados por el peaje urbano. Podemos comprobar en el capítulo 16 (datos de movilidad de la ciudad de Barcelona) que casi el 70% de los viajes realizados en el ámbito de estudio tienen origen y destino dentro de la ciudad de Barcelona. Al ser este tipo de viajes

los de mayor ocurrencia, se ha considerado la hipótesis de que los itinerarios seleccionados se realizan únicamente dentro del continuo urbano de Barcelona dando un carácter preferencial a la movilidad obligada. Para averiguar los tiempos de recorrido actuales, el Ayuntamiento de Barcelona publica los datos en tiempo real de las velocidades en alguno de los itinerarios prefijados, con Google Maps se ha podido comprobar la idoneidad de los tiempos de recorrido en vehículo privado y transporte público utilizados. La Tabla 44 corresponde a esos tiempos dentro del tramo horario 8:00-9:00 h. Con estos datos, tras aplicar el modelo, podemos estimar el porcentaje de viajes que pasarían del vehículo privado hacia los otros modos de transporte (básicamente autobús y medios ferroviarios). A continuación, se muestra tabla con algunas de las vías secundarias afectadas por el peaje urbano utilizadas para estimar los tiempos de viajes:

	TEMP INICIAL (MIN)	TEMP P=9CTS/KM	TEMP P=16CTS/KM	TEMP P=30CTS/KM
Diputació: Marina -> Tarragona	14,00	15,50	17,70	21,70
Consell de Cent: Vilamari --> Diagonal	15,00	16,80	18,90	22,70
Mallorca: Roger de Lluria --> Av. Roma	8,00	10,10	12,60	15,30
Pujades: Selva de Mar --> Marina	12,00	14,10	16,20	20,20
Calabria: Parlament -> Londres	10,00	11,80	13,20	16,90
Llança: Aragó -> Travessera les Corts	6,00	8,90	11,20	14,20
Rocafort: Av. Josep Tarradellas -> Manso	9,00	10,40	13,50	17,20
Els Vergos-> Paral·lel	26,00	28,00	30,30	35,20
Conde Borrell: Valencia -> Tamarit	17,00	20,70	22,40	27,60
Casanova: Ronda Sant Antoni -> Provença	6,00	8,50	10,70	14,30
Carrer Lepant: Ronda Guinardo -> Av. Icaria	14,00	17,90	19,10	24,20
Zamora: Av. Icaria-> Travessera de Gracia	13,00	13,90	14,70	17,20
Pere IV: Zamora -> Diagonal	11,00	12,50	14,20	17,30
Sant fructuos: Mexic -> Passeig Zona Franca	7,00	9,10	12,60	16,10
Rector Triadó-Comptes Bell-lloc: Gran Via -> Travessera de les Corts	18,00	20,40	22,40	25,90
Pujades-Cristobal de Moura: Bilbao -> Diagonal	11,00	12,30	14,50	17,10
Trueta: Ramón Trias Fargas -> Rambla Poblenou	7,00	9,30	10,60	13,90
Ramon Turró: Rambla Poblenou -> Marina	7,00	8,50	9,60	12,50
Brusi-Madrado: Via Augusta -> Diagonal	7,00	8,30	9,30	12,30
Rambla Catalunya: Gran Via -> Diagonal	8,00	10,10	11,90	14,20
Luça-Galileu: Av. Madrid -> Travessera de les Corts	5,00	7,70	9,70	12,90

**Tabla 44. Tiempos de viajes en algunos itinerarios utilizando vías de la red secundaria.**

En el anejo C se adjuntan tablas con los resultados del modelo empleado para cada escenario tarifario. Seguidamente, mostramos un resumen de los porcentajes promedios modales estimados en la red secundaria tras la aplicación del peaje:

	% Coche	%Autobús	% Modos ferroviarios
Reparto modal promedio para la tarifa de 9 cts/km	16%	40%	44%
Reparto modal promedio para tarifa de 16 cts/km	15%	41%	44%
Reparto modal promedio para la tarifa de 30cts/km	13%	42%	45%

**Tabla 45. Valores promedio del reparto modal en la red secundaria para los diferentes escenarios tarifarios**

Los resultados obtenidos muestran que para cualquier situación de peaje el porcentaje de vehículos que son expulsados de la red básica y que se transferiría al transporte público es superior al 80%. El modelo de

reparto modal utilizado aparentemente penaliza mucho los viajes en vehículo privado y favorece el uso de los medios de transporte público. Para contrastar estos resultados nos apoyaremos en el estudio realizado por el RACC en diciembre de 2019, que analiza el impacto de la zona de bajas emisiones de Barcelona sobre la demanda de transporte público.

El estudio estima que el número de vehículos sin etiqueta ambiental es de 108.000 y, por tanto, la nueva medida afectaría a 134.000 personas. Los afectados por la medida necesitarían alternativas fiables para poder seguir realizando sus desplazamientos. Por ello, se ha estudiado el volumen de plazas libres del transporte público en hora punta y la capacidad de dar servicio a aquellas personas que decían utilizar el transporte público en lugar del vehículo privado. Una encuesta a 400 conductores que tenían vehículos sin etiqueta ambiental y que se movían dentro de Barcelona o entre Barcelona y el Área Metropolitana de Barcelona permitió analizar cómo valoran las alternativas a sus desplazamientos habituales. En la Figura 96 y Figura 97 se adjuntan los resultados obtenidos de las encuestas:

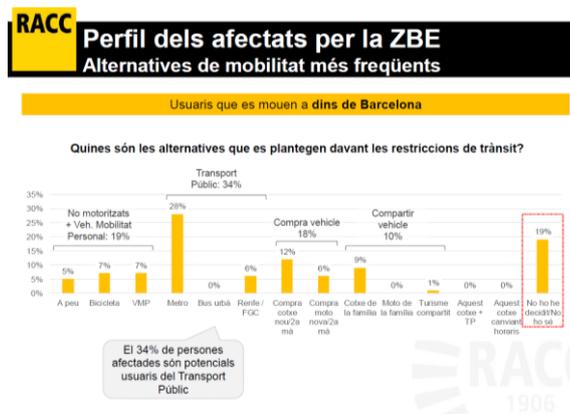


Figura 96. Encuestas sobre las alternativas que se plantean los usuarios de vehículos sin etiqueta ambiental que se mueven dentro de Barcelona tras la implementación de la Zona de Bajas Emisiones.

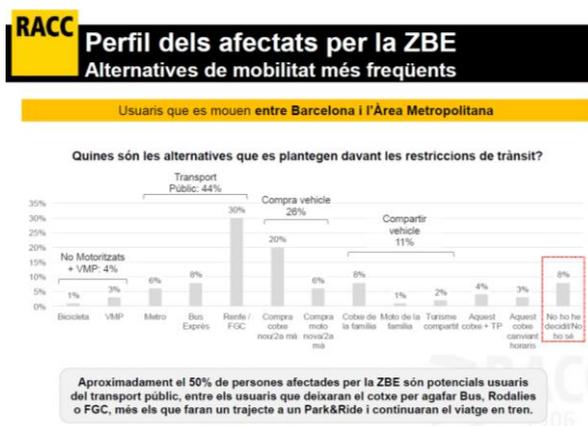


Figura 97. Encuestas sobre las alternativas que se plantean los usuarios de vehículos sin etiqueta ambiental que se mueven entre Barcelona y el Área Metropolitana tras la implementación de la Zona de Bajas Emisiones.

De estos resultados podemos concluir que la implementación de la ZBE podría llegar a provocar, en aquellos usuarios de vehículos sin etiqueta ambiental, un cambio modal hacia modos de transporte alternativos (Bus, Metro, Renfe, FGC, Bicicleta, a pie) de alrededor del 50% de media. Este porcentaje es

sensiblemente inferior al obtenido por nuestro modelo de reparto modal para aquellos viajes que cambian de modo al pasar desde la red básica hacia la red secundaria una vez aplicado peaje. La situación es, evidentemente, muy distinta, pero confirma la predisposición al cambio modal cuando se modifican las condiciones del viaje urbano. En todo caso, y para estar del lado de la seguridad, se ha considerado adecuado, para la estimación de los efectos del peaje, definir el número de viajes transferidos hacia el transporte público como una variable aleatoria con un rango que se moverá entre el 50% y 100%. Este planteamiento se verá con más detenimiento en el análisis de sensibilidad que realizaremos para el estudio socioeconómico utilizando como referencia los resultados de la Tabla 45.

## 12.9 Conclusiones del estudio de tráfico

Los resultados obtenidos muestran que se podría llegar a reducir el tráfico en la red básica de Barcelona un 21%, con una tarifa de 16 cts/km. La aplicación de esta tarifa junto a medidas que ayuden a garantizar el cambio modal, desde el vehículo privado hacia el transporte público, podría permitir cumplir con los límites de contaminación atmosférica establecidos por la Unión Europea. Se observa que a medida que aumentamos la tarifa de peaje vamos saturando cada vez más los viales de la red secundaria, pero también que, aunque disminuye la demanda en la red básica, ésta se hace más inelástica. Ello es debido a la saturación en la red alternativa cuyo efecto se potencia con la restricción de velocidad de 50 km/h por ser el límite legal de velocidad dentro de una red urbana. A continuación, se muestran graficas con la variación de la demanda y la velocidad en ambas redes en función de la tarifa.

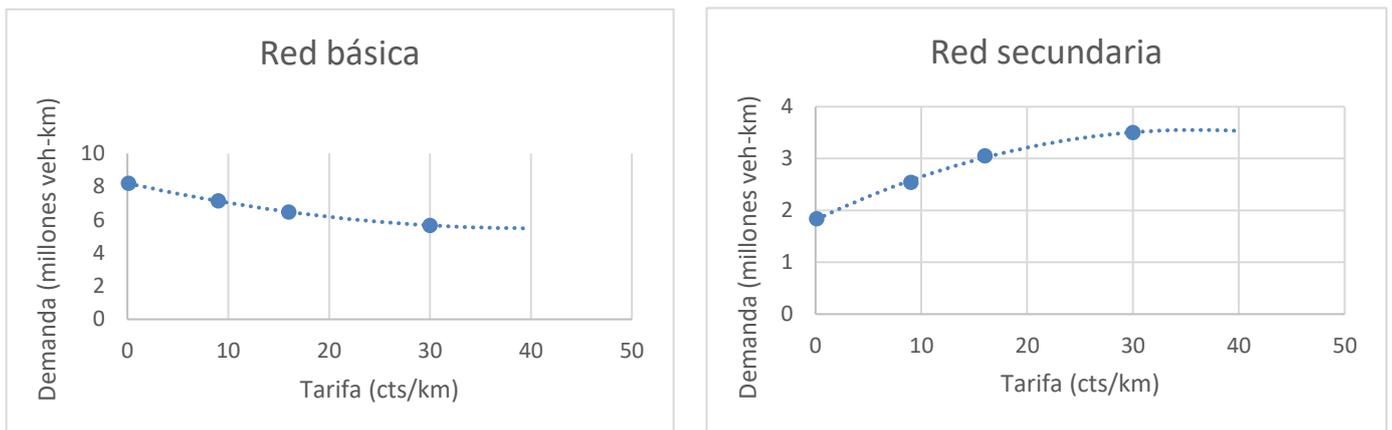


Figura 98. Variación de la demanda en millones de veh-km en red básica y secundaria en función de la tarifa

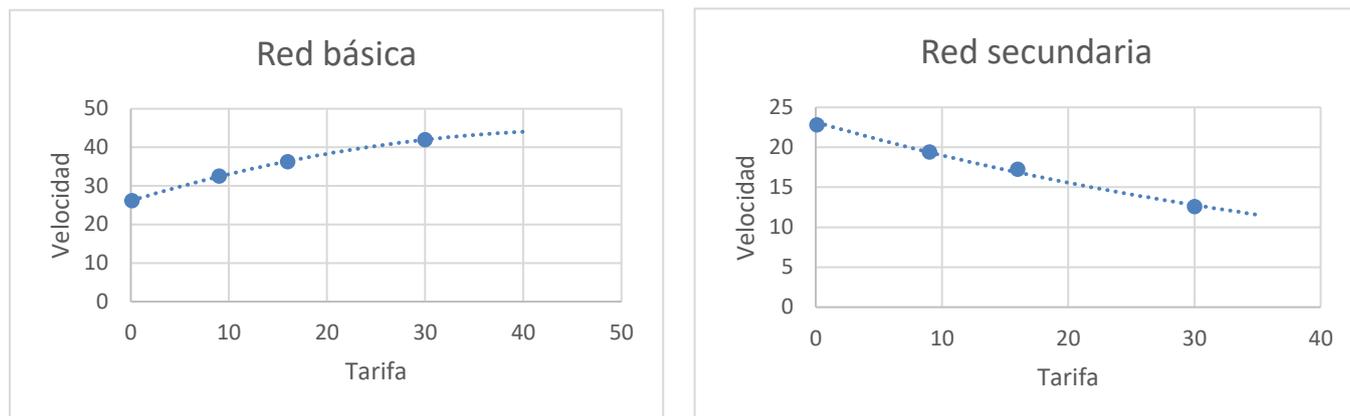


Figura 99. Variación de la velocidad en la red básica y secundaria en función de la tarifa

Observando las gráficas vemos que, como podíamos intuir, a medida que la tarifa de peaje crece, la demanda (en veh-km) en la red básica disminuye, mientras que la velocidad de circulación aumenta; por el contrario, en la red secundaria la demanda (en veh-km) aumenta mientras que la velocidad de circulación disminuye. No obstante, hay que indicar que los resultados obtenidos del modelo, tal como se ha comentado, no llegarán a materializarse en la red secundaria en la práctica, o lo harán durante un corto periodo de tiempo pues muchos viajes, al ver aumentar sus tiempos de desplazamiento, cambiarán de modo de transporte. Estos tiempos teóricos del modelo de asignación, que no prevé más que cambios de itinerarios, son los que se han aplicado al modelo de reparto modal utilizado.

Ante estos resultados, parece lógico pensar que para lograr un impacto más progresivo de la medida y conseguir una mayor aceptación ciudadana de la misma, podría ser recomendable empezar con tarifas de peaje relativamente bajas para progresivamente aumentarlas. Además, como se ha comentado, para favorecer el cambio modal sería conveniente aplicar medidas en paralelo a las mejoras en el servicio de transporte público, como: implantación de supermanzanas en determinadas zonas, actuaciones en la regulación semafórica, actuaciones dentro de la red secundaria para reducir su capacidad peatonalizando calles, adoptando políticas de aparcamiento que dificulten el paso de los vehículos y penalicen su uso, etc.

### 12.10 Análisis socioeconómico del proyecto

El análisis coste-beneficio de los proyectos de infraestructura ayuda a tomar decisiones, al permitir comparar el beneficio social esperado con el coste de oportunidad de la inversión. En el presente apartado se analizan los costes y los beneficios que supondría la aplicación del peaje urbano en la ciudad de Barcelona planteado en el presente trabajo. Se han supuesto tres escenarios de tarificación sobre la red básica de la ciudad. El primer escenario contempla aplicar una tarifa de 9 cts/km, el segundo de 16 cts/km, y el tercero de 30 cts/km. Los ingresos del nuevo sistema de peaje deberían ser capaces de cubrir los costes de financiación y mantenimiento del proyecto y dejar un margen para que el Ayuntamiento pueda aplicar los beneficios obtenidos a políticas de transporte sostenible.

Hay que mencionar que el nuevo sistema de peaje urbano podría afectar a los ingresos municipales por aparcamiento, puesto que la concepción del modelo llevaría implícito una eliminación progresiva de los aparcamientos en superficie ubicados en la red básica de la ciudad. Este efecto no ha sido considerado dentro de nuestro análisis.

Por otro lado, en el presente estudio no se analizan con detalle los posibles costes derivados de una ampliación de la red de transporte público; este punto debería ser tratado en futuras líneas de investigación.

Por último, cabe indicar que los datos obtenidos del presente estudio son fruto de los resultados de tráfico obtenidos de las simulaciones y en ningún caso han sido contrastados con ninguna prueba piloto.

### **12.10.1 Antecedentes**

Según (Eliasson, 2009b), aplicar un peaje óptimo en una zona congestionada dará un superávit social, en un nivel agregado (excedente del consumidor + excedente del productor + externalidades = excedente social). Sin embargo, no es evidente que esto sea válido para un sistema real de peaje urbano. En primer lugar, porque los costes de inversión y operación pueden ser mayores que el superávit social resultante de una menor congestión. En segundo lugar, porque las restricciones políticas, físicas o técnicas podrían evitar la aplicación de una tarifa óptima de peaje. De hecho, un sistema de peaje mal diseñado podría generar una congestión en los viales no tarificados que supusiera mayores costes que los beneficios obtenidos por la congestión aliviada en los viales tarificados (Eliasson, 2009a). En tercer lugar, porque la formulación estándar del análisis coste-beneficio en la mayoría de guías no tiene en cuenta los efectos indirectos en otros mercados, como del trabajo (Parry and Bento, 2001), o los costes de aglomeración en el sistema de movilidad que se podrían medir a través de la accesibilidad (Eliasson & Fosgerau, 2017). En este trabajo, no se estudiarán los efectos de segundo orden fuera del sector del transporte (por ejemplo, los efectos sobre los mercados del trabajo o de la vivienda), pero sí se analizará si los beneficios netos a los usuarios del sistema de transporte y la disminución de la contaminación obtenida, son suficientes para compensar los costes de inversión y de funcionamiento.

Hay una notable escasez de resultados publicados sobre los efectos en el bienestar de los sistemas de peaje por congestión en el mundo real. En ellos, esencialmente se compara el valor de las ganancias de tiempo y los efectos ambientales con el coste del sistema. Son estudios muy simples, al menos si los contrastamos con la vasta literatura sobre cuestiones teóricas de la movilidad: efectos de equidad, aceptabilidad del sistema, etc. Algunos de estos estudios teóricos examinan los efectos sobre el bienestar social que produciría la aplicación de una tasa por congestión (Arnott, De Palma y Lindsey, 1994; Evans, 1992; Glazer & Niskanen, 2000; Verhoef & Small, 2004). En general, concluyen que, aunque la tasa por congestión aumenta el bienestar social, es probable que su aplicación sea regresiva en aquellas ciudades con patrones de conducción similares entre los grupos de bajos y altos ingresos (Börjesson, 2018).

Los estudios, bastante simples, tal como se ha señalado antes, que analizan el bienestar social producido en ciudades donde se han aplicado tasas por congestión ofrecen resultados muy dispersos. (Danielis, R., Rotaris, L., Marcucci, E., & Massiani, 2012) estiman que el efecto sobre el bienestar social del sistema Ecopass de Milán es de € 7–12 millones por año. Sin embargo, (Gibson, M., & Carnovale, 2015) apoyándose en el estudio de (Chay & Greenstone, 2005) en el que se sugiere que las familias podrían llegar a pagar entre 149-185\$ por unidad de reducción de PM<sub>10</sub>, estiman que los beneficios en el bienestar producidos por la reducción de la contaminación del aire podrían representar casi 2.700 millones de euros por año. El uso en el análisis socioeconómico de la predisposición a pagar de los individuos, obtenida con procedimientos heurísticos y sobre un factor que es prácticamente desconocido por la población, como es el impacto de las partículas en suspensión sobre la salud, puede llevar a resultados aberrantes o, en todo caso, muy distintos de los obtenidos con valores “normativos”.

(Eliasson, 2009c) encuentra un beneficio neto de 70 millones de euros por año para la tasa por congestión de Estocolmo, aunque el excedente del consumidor para los conductores sigue siendo negativo. Sin embargo, (Börjesson & Kristoffersson, 2014) muestran que, al incluir los efectos de red (ahorro de tiempo de viaje en la red), el efecto de la reprogramación de viajes por parte de los viajeros y la variación del valor del tiempo, el excedente del consumidor de la tasa de Estocolmo es, de hecho, positivo. Transport for London (Santos & Shaffer, 2004) y (Prud’homme, R.; Bocarejo, 2005) presentan diferentes análisis de costes y beneficios de la tasa por congestión de Londres basados en los efectos observados sobre el tráfico. El primero llevó a cabo un análisis coste-beneficio del sistema que daba un beneficio anual estimado de 70 millones de euros (incluyendo inversiones y costes de capital a través del contrato con la empresa Capita). (Prud’homme, R.; Bocarejo, 2005) obtuvieron un resultado completamente diferente, obteniendo una pérdida neta anual de 80 millones de euros. Como demuestra (Mackie, 2005) y (Raux, 2005), la diferencia principal entre los dos resultados radica en el cálculo de los ahorros de tiempo (Prud’homme y Bocajero no incluyeron ahorros de tiempo fuera del área de peaje y calcularon ahorros de tiempo inferiores a los de TfL dentro del área de peaje). Además, el valor del tiempo utilizado por Prud’homme y Bocajero fue inferior al utilizado por la TfL, especialmente en viajes de negocios y tráfico de distribución.

También existen algunos estudios sobre equidad social en aplicaciones reales de tasas por congestión. Los realizados en San Francisco (Schiller, 1998), Oslo (Fridstrøm et al., 2000), Estocolmo (Eliasson y Mattsson; 2006) y Cambridge, Northampton y Bedford (Santos y Rojey, 2004) indican que los grupos de altos ingresos son los más afectados, ya que conducen más.

Sin embargo, al analizar los pagos en cuatro ciudades europeas, (Eliasson, 2016) concluye que los cargos por congestión en todas las ciudades son regresivos (es decir, que el peso del total de los pagos por congestión en relación con los ingresos disminuye a medida que aumentan los ingresos). Además, (Levinson, 2010) concluye que, en general, los grupos de altos ingresos se benefician más de los carriles

HOT<sup>98</sup>. (Ison, S., & Rye, 2005) y (Rye, T., Gaunt, M., & Ison, 2008) señalan que si no se considera el uso social que se hace de los ingresos, los sistemas de cobro por congestión (propuestos) en el Reino Unido (el sistema de Londres y otros sistemas sugeridos) y Singapur no son equitativos. En este último caso, (Wilson, 1998) analiza los efectos parciales sobre el bienestar (excluyendo el tráfico comercial) del antiguo sistema de peaje, basado en el “Area Licensing Scheme (ALS)”, concluyendo que pudo haber reducido el bienestar, ya que los costes de explotación fueron más altos que el valor de los ahorros de tiempo obtenidos (el sistema de concesión de licencias de Singapur fue reemplazado por el peaje electrónico en 1997).

El sistema de peaje de Oslo ha sido particularmente estudiado. (Ramjerdi, 1995) analiza los efectos sobre el bienestar del sistema de peaje introducido en 1989, concluyendo que los beneficios de la pequeña reducción en la congestión fueron inferiores a los costes de la recaudación del peaje. Esto no es sorprendente, ya que el peaje de Oslo fue diseñado para aumentar los ingresos a la administración y no para mejorar el tráfico, pero no es una valoración aceptable desde el punto de vista teórico del Análisis Coste Beneficio (ACB), ya que la recaudación es esencialmente una transferencia que no implica pérdida o ganancia de recursos. En otros estudios, de mayor interés, se comparan los ahorros del sistema de transporte con los costes reales de operación (10,52-15,78 m€ /año, incluidos los costes de inversión): (Grue, B.; Larsen, O.I.; Rekdal, J.; Tretvik, 1997) analizan una versión diferenciada en el tiempo del peaje del cordón de Oslo, calculando que los beneficios sociales son 380 NOK/cápita/año (alrededor de 38,92 m€/año en total), incluyendo sólo las ganancias de tiempo: (Minken, H.; Fridstrøm, L.; Arild Vold, 2001) analizan un sistema similar, estimando el valor de los ahorros de tiempo en 593 NOK/cápita/año (alrededor de 61,02 m€/año en total). (Rich, J.; Nielsen, 2007) también realizaron un estudio, pero más completo, en el sentido de que también incluyeron los beneficios de la seguridad del tráfico, así como la reducción en emisiones contaminantes, comparando los beneficios totales con los costes previstos de inversión y operación. Los autores concluyeron que los esquemas de peaje debían ser rediseñados, ya que los ahorros de tiempo no compensaban las pérdidas para los viajeros desalojados. Cuando se tienen en cuenta otros beneficios, como la reducción de las emisiones y los accidentes, los beneficios totales aumentan, pero en este caso aún no superaban la inversión estimada y los costos operativos del sistema.

Varios autores han enfatizado que el uso de los ingresos debe tenerse en cuenta para obtener una imagen completa de los efectos en la equidad de un sistema de cobro por congestión (Eliasson y Mattsson 2006; de Palma y Lindsey 2004; Santos y Rojey 2004; Small 1982, 1983). (Ison, S., & Rye, 2005) argumentan que, por razones de equidad, los ingresos obtenidos por el sistema se deberían emplear en el transporte público local. Este es el caso en Londres. En Gotemburgo, los ingresos cofinancian un paquete de inversiones en

---

<sup>98</sup> HOT es la sigla en inglés para “High-Occupancy or Toll” (Alta Ocupación o Peaje), y los “carriles HOT” son carriles de tránsito abiertos solamente a los vehículos de alta ocupación (definida de diferentes maneras) y a los vehículos por los cuales es abonado un peaje. Los peajes son cobrados electrónicamente, y los importes debitados de las cuentas de los usuarios de la carretera sin que los vehículos deban detenerse. Las cuentas son identificadas por unidades del tamaño de una tarjeta de crédito adosadas al parabrisas, las que contienen códigos de identificación únicos. Los peajes varían conforme el momento del día a efectos de asegurar siempre un viaje libre de congestiones. Los peajes variables alientan a los usuarios a modificar sus viajes desde los periodos más congestionados a los menos congestionados; o hacia otras rutas; o a compartir el vehículo con otros individuos (car-pool en inglés.) Dado que los viajes no pueden ser modificados en las horas pico, los peajes elevados son necesarios para pagar por las instalaciones requeridas para satisfacer las demandas en esos horarios pico.

infraestructuras (Acuerdo de Suecia Occidental, 28 de octubre de 2009). La mayor inversión del paquete fue el West Link (2.000 millones), que es un enlace ferroviario de 8 km que incluye un túnel de 6 km bajo el centro de Gotemburgo. La mayoría de los beneficios de West Link se acumulan para las personas que residen cerca de las estaciones de tren en la región de Gotemburgo, y no principalmente para los viajeros afectados por el sistema de peaje. Además, si la tasa por congestión no hubiera financiado el túnel, éste posiblemente nunca se hubiera construido (Acuerdo sueco occidental, 28 de octubre de 2009) con la consiguiente pérdida de inversión. En todo caso habría que ver, mediante un análisis coste-beneficio, si dicha inversión, utilizando fondos derivados del peaje, estaba justificada.

Como se puede observar, los valores observados en la literatura, tanto los asignados a los beneficios socioeconómico, debido a las dificultades objetivas de otorgar valores sociales a las externalidades en el entorno urbano, como los relacionados con las consecuencias de los peajes sobre la equidad, son muy variados y, en todo caso, difíciles de adaptar a Barcelona. En nuestro caso se ha intentado abordar la cuestión de la monetización en el ACB usando valores comúnmente aceptados y relativamente conservadores.

#### **12.10.2 Efectos sobre el sistema de transporte por la implantación de peaje urbano**

La implementación del peaje urbano llevará implícito la obtención de una serie de efectos en el sistema de transporte de la ciudad, que vamos a tratar de cuantificar y monetizar. En el anejo C podemos encontrar ciertos valores utilizados para la cuantificación de estos efectos.

##### **a) Ahorro del tiempo de los viajeros en vehículo privado que utilizan el peaje urbano**

En este apartado hemos partido de los vehículos equivalentes y tiempos de desplazamientos obtenidos en las simulaciones. Dado que la variabilidad en el tiempo de viaje no está implementada en el modelo de transporte a nivel matriz OD, realizaremos una aproximación de la magnitud del efecto del peaje. Se parte de la hipótesis que la aplicación del peaje urbano llevará asociada una serie de medidas para garantizar, en un futuro, el trasvase de tráfico de vehículos privados desde las vías secundarias hacia medios de transporte públicos colectivos, ayudando a la implantación definitiva de las supermanzanas. Cabe recordar, que la situación simulada aplicando un peaje de 9 cts/km equivaldría a una reducción del número de vehículos-kilómetros del 13% mientras que aplicando un peaje de 16 cts/km esta reducción pasaría al 21%. Teniendo en cuenta que del ahorro de tiempo se beneficiarán los usuarios de la red básica, utilizaremos los tiempos medios de desplazamiento obtenidos de las simulaciones para cada situación de peaje.

Por otro lado, para el cálculo monetario estimamos un valor medio del tiempo de viaje de 10,8 €/h, según el estudio Trambaix y Trambesós 2009 (ver Tabla 36). Se ha llegado a este valor realizando la media ponderada de los distintos valores del tiempo de viaje para los diferentes tipos de movilidad (ocupacional, vuelta a casa y personal) que tenemos. Es probable que el peaje introduzca una distribución diferente de motivos de viaje para los usuarios que continúan utilizando su vehículo porque, lo lógico es que se use más

para los motivos con mayor valor del tiempo. El mantenimiento de la distribución actual es, pues, conservador en relación a los beneficios. Por otra parte, estos beneficios se han calculado de una manera simplificada, a partir de los resultados obtenidos del modelo de tráfico, multiplicando el número total de desplazamientos en vehículo privado por su correspondiente variación en el tiempo una vez aplicado el peaje para las diferentes situaciones tarifarias. A continuación, se presenta la formulación utilizada:

$$B_{vpp} = N_v \cdot \Delta t_p \cdot D \cdot VdT/60 \quad (12.1)$$

Donde:

$B_{vpp}$	Beneficio anual obtenido por los vehículos privados que utilizan la red de peaje urbano.
$N_v$	Número de viajes al día en vehículo privado en la red básica.
$\Delta t_p$	Variación del tiempo medio de viaje en vehículo privado entre la red básica y el escenario base.
D	Días de operación al año del peaje urbano.
VdT	Valor medio del tiempo.

Con todo esto se han obtenido los siguientes resultados:

	$N_v$ (*10 <sup>6</sup> )	$\Delta t_p$ (min)	D (año)	VdT (€/h)	$B_{vpp}$ (m€/año)
Escenario base	1,44				
P=9 cts/km	1,25	2,06	250	10,8	116
P=16 cts/km	1,14	3,63	250	10,8	186
P=30 cts/km	0,99	4,91	250	10,8	220

Tabla 46. Beneficios obtenidos por los viajeros en vehículo privados que utilizan la red de peaje urbano.

#### b) Pérdida de bienestar de los viajeros en vehículo privado que no usan la red de peaje urbano

De los resultados obtenidos en las simulaciones concluimos que los conductores, que no usan la red de peaje urbano y optan por utilizar la red secundaria de transporte, ven aumentar su tiempo de viaje respecto a su situación inicial según se puede observar en los resultados de la Tabla 47. Ya se ha comentado que los valores de tiempos de viaje obtenidos en la red secundaria por el modelo de transporte, previsiblemente en la práctica serán inferiores, no obstante, estos tiempos de viajes nos dejan del lado de la seguridad desde el punto de vista del análisis coste beneficio. Respecto al cálculo de las pérdidas monetarias producidas en estos conductores lo haremos de una manera simplificada. Tomando los resultados obtenidos del modelo de tráfico y del modelo de reparto modal, multiplicaremos el número total de desplazamientos en vehículo privado dentro de la red secundaria, por su correspondiente variación de tiempo viaje una vez aplicado el peaje para las diferentes situaciones tarifarias. Indicar que se ha utilizado el mismo valor de tiempo para los usuarios de la red básica de peaje que para los de la red secundaria. Es posible que el valor del tiempo sea inferior para los usuarios que no utilizan el peaje, por ello, aunque no es objeto del presente trabajo, su

cálculo más preciso podría ser una línea futura de investigación. En todo caso, al adoptar un valor alto para las pérdidas de tiempo reducimos los beneficios del proyecto y nos colocamos del lado de la seguridad. A continuación, se presenta la formulación utilizada para el cálculo de la pérdida de bienestar de los viajeros en vehículo privado que usarían la red secundaria de transporte:

$$P_{bvp} = N_{vs} \cdot \Delta t_s \cdot D \cdot VdT / 60 \quad (12.2)$$

Donde:

$P_{bvp}$	Pérdida de bienestar anual de los viajeros en vehículo privado que no utilizan el peaje urbano.
$N_{vs}$	Número de viajes al día en vehículo privado en la red secundaria.
$\Delta t_s$	Variación del tiempo medio de viaje en veh. privado entre la red secundaria y el escenario base.
D	Días de operación al año del peaje urbano.
VdT	Valor medio del tiempo.

A continuación, se presentan los resultados monetarios:

	$N_{vs} (*10^4)$	$\Delta t_s (min)$	D (año)	VdT (€/h)	$P_{bvp}$ (m€/año)
P=9 cts/km	2,0	4,5	250	10,8	-4,0
P=16 cts/km	3,2	6,7	250	10,8	-10
P=30 cts/km	3,8	12,1	250	10,8	-21

Tabla 47 Pérdida anual del bienestar de los viajeros en vehículo privado que no usan la red de peaje

### c) Pérdida de bienestar de los viajeros en vehículo privado que pasan al transporte público

En el presente apartado, se cuantifican las pérdidas monetarias de aquellos conductores que tras la aplicación del peaje urbano se verían afectados por un mayor tiempo de viaje al tener que utilizar medios de transporte público. Hay que indicar que el modelo utilizado para la estimación de este efecto, contempla como modos de transporte público el autobús y los medios ferroviarios (Metro, Ferrocarrils de la Generalitat, Tranvía y Rodalies Renfe). En el presente estudio no se han considerado medios alternativos de transporte como ir a pie, en bicicleta o en monopatín, debido a que el modelo de reparto modal que hemos aplicado no los tiene implementados. Este hecho implica que las estimaciones realizada sobre las nuevas necesidades de transporte público estén del lado de la seguridad.

A través de los resultados obtenidos en el modelo utilizado (ver Tabla 45), se concluye que, en línea generales, más de un 80% de los usuarios del vehículo privado, que pasan a incrementar las vías secundarias tras aplicar el peaje, pasarían a modos de transporte colectivo. Puesto que el modelo de tráfico que hemos utilizado no cuenta con la implementación de las matrices OD del transporte público, para analizar el efecto del peaje urbano en sus tiempos de viaje, realizaremos una aproximación de la magnitud del efecto. Para ello nos hemos apoyado en los resultados de la encuesta de movilidad en día laborable (EMEF 2016),

realizada por el Área Metropolitana de Barcelona, sobre la duración media percibida por los residentes de Barcelona en sus desplazamientos en los diferentes medios de transporte.

MEDIO DE TRANSPORTE	DURACIÓN PERCIBIDA (MIN)
Autobús	29,5
Metro	30,6
Tranvía	34,3
FGC <sup>99</sup>	36,9
Coche con conductor	26,7
Coche con acompañante	31,9
Moto	15,8

Tabla 48. Duración media percibida de los desplazamientos por los residentes de Barcelona. Fuente: EMEF 2016

De estos datos concluimos que la duración de viaje media percibida en transporte público es un 46% superior a la percibida en el vehículo privado. A continuación, se indica la formulación utilizada para el cálculo de la pérdida de bienestar de los viajeros en vehículo privado que pasarían al transporte público en el caso de la aplicación del peaje urbano:

$$P_{btp} = N_{vtp} \cdot \Delta t_{vp-tp} \cdot D \cdot VdT/60 \quad (12.3)$$

Donde:

- $P_{btp}$  Pérdida de bienestar anual de los viajeros en vehículos privados que pasan al transporte público.
- $N_{vtp}$  Número de viajes diarios realizados en los diferentes medios de transporte público.
- $\Delta t_{vp-tp}$  Variación del tiempo medio de viaje percibido entre el transporte público y el vehículo privado.
- $D$  Días de operación al año del peaje urbano.
- $VdT$  Valor medio del tiempo.

Indicar que se utilizará el mismo valor del tiempo que en los casos anteriores, aunque es posible que su valor fuera bastante inferior, de manera que adoptándolo nos colocamos del lado de la seguridad. Su cálculo podría ser objeto de estudio en futuras líneas de investigación. A continuación, se muestra los resultados obtenidos:

<sup>99</sup> FGC es la abreviatura de "Ferrocarrils de la Generalitat". es una compañía de ferrocarril propiedad de la Generalitat de Catalunya, que opera varios corredores ferroviarios y estaciones de esquí en Cataluña (España). En total la compañía opera 140 km de vía estrecha (1.000 mm) y 42 km de vía estándar (1.435 mm) en la provincia de Barcelona y 89 km de vía ancha (o ancho de vía ibérico, 1.668 mm) en la provincia de Lérida y los Pirineos, dos trenes cremallera y varios funiculares.

	$N_{vtp} (*10^5)$	$\Delta t_{vp-tp}$ (min)	D (año)	VdT (€/h)	$P_{btp}$ (m€/año)
P=9 cts/km	1,02	6,53	250	10,8	-30
P=16 cts/km	1,80	6,53	250	10,8	-53
P=30 cts/km	2,53	6,53	250	10,8	-74

Tabla 49. Pérdida del bienestar anual de los viajeros en vehículo privado que pasan al transporte público

**d) Viajeros desplazados del área intra-rondas**

En este apartado consideramos aquellos viajeros que una vez implantado el peaje urbano dejan de realizar el viaje dentro del área intra-rondas de la ciudad. Esto quiere decir que dichos viajeros deciden no pagar el peaje utilizando caminos alternativos fuera del área intra-rondas. Estas rutas alternativas podrían utilizar viales como la ronda de Dalt o de Litoral. Para monetizar el impacto económico de estos viajeros hemos partido de la hipótesis de que estos viajes tendrán como máximo una variación de tiempo de viaje igual a la que tendrían los viajeros que utilizarán la red secundaria de transporte. De esta forma, previsiblemente, estaríamos del lado de la seguridad pues muy probablemente los viajeros desplazados intentarían mejorar sus tiempos seleccionando rutas más rápidas. A continuación, se indica la formulación utilizada para el cálculo de la pérdida de bienestar de estos viajes:

$$P_{bs} = N_{vr} \cdot \Delta t_{vr} \cdot D \cdot VdT / 60 \quad (12.4)$$

Donde:

- $P_{bs}$  Pérdida diaria de bienestar de los viajeros desplazados del área intra-rondas.
- $N_{vr}$  Número de viajes diarios que salen del área intra-rondas.
- $\Delta t_{vr}$  Variación entre el tiempo medio del viaje realizado fuera y dentro del área intra-rondas.
- D Días de operación al año del peaje urbano.
- VdT Valor medio del tiempo.

	$N_{vr}$	$\Delta t_{vr}$ (min)	D (año)	VdT (€/h)	$P_{bs}$ (m€)
P=9 cts/km	64.677	4,6	250	10,8	-13
P=16 cts/km	89.648	6,7	250	10,8	-27
P=16 cts/km	153.132	12,1	250	10,8	-83

Tabla 50 Pérdida anual del bienestar de los viajeros desplazados del área intra-rondas

**e) Viajeros que dejarán de hacer el viaje tras la aplicación del peaje urbano**

En cuanto a los viajeros que dejarían de hacer el viaje tras la aplicación del peaje urbano, hay que indicar que nuestro modelo de reparto modal no considera esta opción. Se ha partido, por tanto, de la hipótesis de que el número de viajes se conserva. Como que a los viajeros “evaporados” habría que aplicarles la regla

del excedente del consumidor, que supondría penalizarlos sólo con la mitad del coste con relación a los que continúan viajando, la hipótesis adoptada en el ACB de considerar el coste total cae del lado de la seguridad.

**f) Ahorro de costes de funcionamiento del vehículo privado**

Es de esperar que la implementación del peaje urbano en Barcelona ayudará a reducir el número de viajes en vehículo privado a favor del transporte colectivo. Este hecho implica que aquellos viajeros que dejan de viajar en su vehículo privado, porque pasan a realizar el viaje en transporte público, tendrán unos ahorros vinculados a su vehículo. Podemos decir que el peaje urbano producirá una reducción de los costes de funcionamiento del vehículo privado. Obtener los costos unitarios de funcionamiento relacionados con la movilidad de estos vehículos privados es difícil, debido a los diferentes tipos de vehículos y a variabilidad de los precios del combustible y también de lubricantes, neumáticos, etc. Además, el hecho de que estos viajeros no vayan a utilizar su vehículo diariamente por motivos laborales, no implica que se vayan a deshacer del vehículo privado, puesto que es posible que lo sigan utilizando para otro tipo de viajes, por ejemplo, de tiempo libre. En este estudio sólo hemos considerado el ahorro de costes de funcionamiento vinculados a la circulación del vehículo y que dependen de los kilómetros recorridos; no se han considerado los costes indirectos relacionados la adquisición de vehículos, seguros o impuestos de circulación ya que no podemos inferir el impacto del peaje sobre la propiedad del automóvil y, en todo caso, ello nos deja del lado de la seguridad desde el punto de vista del análisis coste-beneficio. En el anejo E se detallan los cálculos realizados y la metodología empleada. En la Tabla 51 se presenta un resumen con los resultados obtenidos:

	Ahorro en los costes de funcionamiento del vehículo privado (m€/año)
P=9 cts/km	24
P=16 cts/km	42
P=30 cts/km	58

**Tabla 51. Ahorro en los costes de funcionamiento del vehículo privado.**

**g) Costes de inversión y operación del transporte público adicional para atender el cambio modal**

La implementación del peaje urbano en la ciudad, según indica el modelo de tráfico utilizado, produciría un trasvase de usuarios del vehículo privado desde la red básica de transporte hacia la red secundaria. De esta forma, la red básica gozaría de unas mejores condiciones de circulación mientras que la red secundaria las empeoraría. Si además incidimos en la regulación semafórica de ambas vías, penalizando a los usuarios de la red secundaria, forzaríamos aún más el cambio modal hacia medios de transporte público. Este trasvase de viajeros hacia el transporte público que, según el modelo utilizado, se estima que, en líneas generales, superaría el 80% de los usuarios trasvasados desde la red básica hacia la red secundaria, implicaría una necesidad de actuación en el sistema de transporte público para que pudiera absorber la

nueva demanda generada. En este apartado se intenta cuantificar los costes necesarios para atender a la nueva demanda de transporte público a partir de la siguiente metodología:

$$C_{\Delta TP_i} = C_{Inv_i} + C_{O,m_i} + C_{Infr_i} \quad (12.5)$$

Donde:

$C_{\Delta TP_i}$	Costes anuales del incremento del transporte público de la nueva demanda
$C_{Inv_i}$	Costes anuales de inversión de los nuevos vehículos de transporte público para atender la nueva
$C_{O,m_i}$	Coste anual de operación y mantenimiento de los nuevos vehículos
$C_{infr_i}$	Coste anualizado de la inversión en nuevas infraestructuras de transporte

- **Costes anuales de inversión del transporte público adicional ( $C_{Inv_i}$ )**

Para el cálculo del coste de inversión adicional en transporte público necesario para que se pueda atender esta nueva demanda sería necesario un estudio detallado, debido a la complejidad del problema. Puesto que el objetivo de este trabajo es tener un orden de magnitud de este impacto, aproximaremos la solución utilizando la información disponible del sistema de autobús y metro de Barcelona publicados por TMB (Transports Metropolitans de Barcelona) para el año 2018 (ver anejo F). Para los costes del material móvil utilizaremos las recomendaciones del SAIT.

Según nuestro modelo de reparto modal, los vehículos equivalentes desalojados por el peaje urbano hacia el transporte público se irían básicamente hacia el autobús o hacia modos ferroviarios (metro, tranvía, FGC y cercanías) según la Tabla 45. Analizando los datos básicos de TMB para el 2018 observamos que del total de viajes en transporte público el 25 % se realizaron en autobús, 49% en Metro, 10% en FGC, 4% en Tranvía y 17% en Renfe. Dentro del porcentaje de transportes ferroviarios, el 65% de los viajes se realizaron en metro, 13% en FGC, 4% en Tranvía y 17% en Renfe. A continuación, se presenta tabla con el número de viajes realizados en transporte público en Barcelona en el año 2018:

Datos TMB 2018 (millones de viajes)	
N viajes Bus	202,91
N viajes Metro	407,51
N FGC	81,4
N Tranvía	26,8
Rodalies <sup>100</sup>	108,2

**Tabla 52. Viajes anuales según medio de transporte público en Barcelona. Fuente: TMB (Transports Metropolitans de Barcelona, S.A.)**

<sup>100</sup> Rodalies de Catalunya (antiguamente *Cercanías Barcelona* o *Rodalies Barcelona*) es una marca comercial usada por la Generalitat de Catalunya y Renfe Operadora para los servicios ferroviarios de cercanías y de media distancia traspasados por el Ministerio de Fomento de España a la Generalitat a partir del 1 de enero de 2010 y del 1 de enero de 2011, respectivamente.<sup>12</sup> Con 462 km en servicio, Rodalies de Catalunya es el servicio de cercanías más extenso de España, por delante de la red de Cercanías de Madrid, con 370 km, y de la red de Cercanías de Sevilla, con 270 km

Teniendo en cuenta la flota de vehículos de los distintos medios de transporte público, obtenemos los viajes anuales por unidad de modo de transporte:

Modo de transporte	Viajes anuales por unidad de modo
Autobús	177.991
Metro	2.612.244
FGC	957.647
Tranvía	653.659
Rodalies	680.503

**Tabla 53. Viajes anuales por unidad de modo de transporte público en Barcelona.**

De los resultados obtenidos en el modelo de tráfico, obtenemos los viajes transferidos hacia el transporte público para las distintas situaciones de peaje son los siguientes:

Viajes diarios transferidos al transporte público	
P=9 cts/km	102.963
P=16 cts/km	180.911
P=30 cts/km	253.536

**Tabla 54. Viajes diarios transferidos por el peaje urbano al transporte público obtenidos al aplicar al modelo de reparto modal.**

Del modelo de reparto obtenemos el porcentaje de los viajes transferidos hacia el autobús y hacia medios ferroviarios:

Viajes diarios transferidos al transporte público	Autobús	Medios ferroviarios
P=9 cts/km	49.030	53.933
P=16 cts/km	87.263	93.648
P=30 cts/km	119.482	134.054

**Tabla 55. Viajes diarios transferidos por el peaje urbano hacia el autobús y medios ferroviarios obtenidos al aplicar el modelo de reparto modal.**

A partir de estos resultados, extrapolándolos a un año de operación y teniendo en cuenta los porcentajes de viajes anuales producidos por cada modo de transporte ferroviario (Metro, FGC, Tranvía, Rodalies) calculados a partir de los datos de TMB, obtenemos los siguientes resultados:

Viajes anuales transferidos al transporte público por medio de transporte público (*10 <sup>6</sup> )	Autobús	Metro	F.G.C	Tranvía	Rodalies
P=9 cts/km	12,3	8,8	1,8	0,6	2,3
P=16 cts/km	21,8	15,3	3,0	1,0	4,0
P=30 cts/km	30,0	21,9	4,4	1,4	5,8

**Tabla 56. Viajes anuales transferidos por el peaje urbano a los diferentes modos de transporte público obtenidos al aplicar el modelo de reparto modal.**

Sabiendo los viajes anuales transferidos hacia cada modo de transporte público y el número de viajes que pueden absorber por unidad obtenemos el número de nuevos vehículos necesarios:

Unidades de nuevos vehículos	Autobús	Metro	FGC	Tranvía	Rodalies
P=9 cts/km	69	3	2	1	3
P=16 cts/km	123	6	3	2	6
P=30 cts/km	168	8	5	2	9

**Tabla 57. Unidades de nuevos vehículos necesarios para absorber la nueva demanda de transporte público tras aplicar el peaje urbano.**

Lo que implicaría los siguientes costes:

Coste nuevos vehículos (m€)	Autobús	Metro	FGC	Tranvía	Rodalies
P=9 cts/km	-17,2	-28,3	-9,6	-2,8	-18,0
P=16 cts/km	-30,6	-49,2	-16,7	-4,9	-31,3
P=30 cts/km	-42,0	-70,4	-24,0	-7,0	-45,5

**Tabla 58. Costes totales de los nuevos vehículos de transporte público necesarios para atender la nueva demanda de transporte público generada por el peaje urbano.**

Repercutiendo la correspondiente vida útil de los diferentes vehículos obtenemos los siguientes costes anuales:

Coste anual de los nuevos vehículos (m€)	Autobús	Metro	FGC	Tranvía	Rodalies
P=9 cts/km	-1,4	-0,9	-0,3	-0,1	-0,6
P=16 cts/km	-2,6	-1,6	-0,6	-0,2	-1,0
P=30 cts/km	-3,5	-2,3	-0,8	-0,2	-1,5

**Tabla 59. Costes anuales de los nuevos vehículos de transporte público necesarios para atender la nueva demanda de transporte público generada por el peaje urbano.**

- **Coste anual de operación y mantenimiento de los nuevos vehículos ( $C_{o,m_i}$ )**

El cálculo del coste anual de operación y mantenimiento incluye un gran número de factores a tener en cuenta. Estos costes se pueden dividir en costes fijos o indirectos, que son los costes provocados por el hecho de tener el vehículo, sin necesidad de circular; y por lo tanto dependen del número de vehículos; y una serie de costes directos relacionados con la circulación del vehículo, que son función de los kilómetros recorridos.

$$C_{o,m_i} = C_{vf} \cdot n_v + c_{mv} \cdot L_i \quad (12.6)$$

Donde:

$C_{o,m_i}$	Coste anual de operación y mantenimiento de los nuevos vehículos de transporte público
$C_{vf}$	Costes fijos/indirectos de los nuevos vehículos del transporte público adicional
$n_v$	Número de nuevos vehículos del transporte público adicional
$C_m$	Costes kilométricos/directos del transporte público adicional
$L_i$	Distancia recorrida anualmente por los vehículos

En el anejo F se detallan los cálculos realizados y la metodología empleada. En la siguiente tabla se presenta un resumen con los resultados obtenidos:

	Coste anual de operación y mantenimiento de los nuevos vehículos (m€)
P=9 cts/km	-14
P=16 cts/km	-24
P=30 cts/km	-33

**Tabla 60 Costes anuales de operación y mantenimiento de los nuevos vehículos de transporte público necesarios para atender la nueva demanda de transporte público generada por el peaje urbano.**

- **Costes de la infraestructura ( $C_{Infr}$ )**

El coste de la infraestructura corresponde a las inversiones realizadas para la puesta en servicio del transporte público. Así pues, comprende la creación de carriles reservados para autobuses, o vía y catenaria para medios ferroviarios. Además, también se contemplan los costes de las paradas, la urbanización de la zona afectada, la adecuación de los accesos al servicio, etc.

Este coste tiene una gran variabilidad, dependiendo de la magnitud y calidades de la obra a realizar. En nuestro estudio partimos de la hipótesis de que no será necesario realizar inversiones para nuevas infraestructuras de transporte, considerando que los nuevos vehículos de transporte público circularán por la infraestructura existente.

### 12.10.3 Efectos sobre la salud de los ciudadanos

Cabe destacar que según el estudio realizado por (Santamarin, Novoa, Racioppi, Olabarria, & Pe, 2006) sustituir viajes motorizados por viajes a pie tiene un impacto considerable en la salud de la población, y particularmente en aquellos individuos que no logran llegar a las recomendaciones de actividad física diaria, provocando un beneficio económico en los costes médicos. (Pérez et al., 2017) indica que entre 2009 y 2013 en la ciudad de Barcelona se produjo un aumento del 26,7% y 72,5% del número de viajes a pie y en bicicleta, respectivamente. Esto dio como resultado un beneficio económico anual promedio 47,3 m€ debido a la caminata y de 4,7 m€ debido al ciclismo.

La implementación del peaje urbano en la ciudad de Barcelona produciría un trasvase de viajes desde el vehículo privado hacia el transporte público. Este hecho implicaría un aumento en la actividad física diaria de aquellos viajeros que deben caminar para utilizar los medios de transporte público. Con la ayuda de la herramienta HEAT<sup>101</sup> podemos estimar una evaluación económica del impacto en la salud de las personas producido por el aumento del tiempo de marcha a pie de aquellos viajeros que pasan al transporte público.

<sup>101</sup> Para facilitar la toma de decisiones la “World Health Organization” ha desarrollado en colaboración con expertos, la herramienta HEAT para estimar el valor de la mortalidad reducida que resulta de aumentar la actividad regular de caminar o montar en bicicleta en las personas. Esta herramienta de evaluación y economía de la actividad de caminar y montar en bicicleta pretende ser parte de análisis integral de coste-beneficio en intervenciones de transporte o proyectos de infraestructura complementando su análisis. Para más información se puede consultar la web <http://old.heatwalkingcycling.org/>.

Utilizando el número de desplazamientos que pasan al transporte público una vez aplicado el peaje (ver Tabla 54) y sabiendo el tiempo empleado caminando de esos viajeros para acceder al autobús o medios ferroviarios, podemos estimar el beneficio anual conseguido para un periodo de 10 años.

Para evaluar el tiempo medio de acceso al transporte público en marcha a pie, hemos utilizado los tiempos de acceso ya calculados en los itinerarios aleatorios utilizados en el modelo de reparto modal. Partiendo de esta hipótesis se ha obtenido un tiempo medio de acceso de 8,2 minutos. Aplicando la herramienta HEAT, a partir del tiempo medio de acceso al transporte público y el número de viajes traspasados al mismo, obtenemos que para el caso de la tarifa de peaje de 9 cts/km, la nueva actividad física de los usuarios traspasados al transporte público podría evitar 13 muertes al año, que representaría un beneficio anual promedio, para un periodo de 10 años, de 21 millones de euros. Del mismo modo, para el caso de la tarifa de peaje de 16 cts/km se podrían evitar 23 muertes con un beneficio anual promedio, para un periodo de 10 años, de 37 millones de euros. Por último, para la tarifa de 30 cts/km se podrían evitar 32 muertes anuales pudiendo conseguirse unos beneficios de 51 millones de euros anuales. Se adjunta a continuación cuadro resumen de los resultados obtenidos:

Efecto sobre la salud de las personas		
Tarifa	Reducción muertes (año)	Beneficio (m€/año)
P=9 cts/km	13	21
P=16 cts/km	23	37
P=30 cts/km	32	51

**Tabla 61. Efectos del peaje urbano sobre la salud de las personas.**

Por otro lado, debido a la reducción en el número de vehículos privados, el peaje urbano produciría una reducción de los niveles de contaminantes atmosféricos como las PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>. Estas partículas en suspensión pueden penetrar profundamente en los pulmones de las personas aumentando el riesgo de enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como de cáncer de pulmón. La OMS fija unos valores máximos de PM<sub>10</sub> de 20 µg/m<sup>3</sup> de media anual con 50 µg/m<sup>3</sup> de media en 24 horas y de 10 µg/m<sup>3</sup> de media anual con 25 µg/m<sup>3</sup> de media en 24 horas para las PM<sub>2,5</sub>. Además, otro de los contaminantes que se vería reducido por la disminución en el número de vehículos privados serían los NO<sub>x</sub> responsables del aumento de los síntomas de bronquitis en niños asmáticos y de una disminución de la capacidad pulmonar de las personas. Su valor máximo según la OMS es de 40 µg/m<sup>3</sup> de media anual con 200 µg/m<sup>3</sup> de media en 1 hora. La implementación del peaje urbano propuesto en Barcelona podría llegar a reducir las cantidades de contaminantes indicadas en las siguientes tablas tomando como valores los recomendados por la



tributaria, costes legales, costes de operadoras de telefonía móvil, costes de pruebas pilotos, costes de información a la ciudadanía, costes de educación y capacitación del personal. Tanto para el cálculo de la inversión del proyecto, como para los costes necesarios para su operación y mantenimiento, se ha consultado a empresas integradoras de sistemas de tráfico que en función de su experiencia en la implementación de sistemas similares nos han orientado en el desarrollo de un presupuesto aproximado.

	Unidad	Precio (M€)	Medición	Importe (M€)
<b>PROYECTO Y ESTUDIOS</b>	ud	2,3	1,0	2,3
<b>SEÑALIZACION</b>				
Suministro e instalación de señalización vertical y horizontal en la nueva área de peaje.	pa	1,8	1,0	1,8
<b>CAMARAS CCTV</b>				
Suministro e instalación de cámaras exteriores móviles y programario, incluyendo elementos de sustentación, armarios, alimentación, cables. Totalmente instalado.	pa	19,1	1,0	19,1
<b>PMV</b>				
Paneles de mensajería variable, pórticos y banderolas incluyendo elementos de sustentación, armarios, cables. Totalmente instalado.	pa	12,0	1,0	12,0
<b>PLC's-ERU's</b>				
PLC's-ERU's. Totalmente instalados.	pa	0,5	1,0	0,5
<b>OBRA CIVIL</b>				
Obra civil (arquetas, cimentaciones, zanjas...)	pa	3,2	1,0	3,2
<b>COMUNICACIONES</b>				
Red de comunicaciones de acceso, ya sean comunicaciones en fibra óptica, inalámbrica mediante equipamiento wifi, 4G/5G, Wimax.	pa	1,8	1,0	1,8
<b>ELECTRONICA DE RED</b>				
Electrónica de Red. Suministro, instalación, configuración y puesta en marcha de toda la red de comunicaciones. Incluyendo cualquier tipo de elemento necesario switches, convertidores, concentradores. Se incluye integración, licencias y mano de obra.	pa	1,1	1,0	1,1
<b>INSTALACIONES ELECTRICAS</b>				
Instalaciones eléctricas. Se incluye el suministro y la instalación de cualquier cable eléctrico, armarios, así como gestiones y trámites con compañías eléctricas	pa	1,4	1,0	1,4
<b>CENTRO DE CONTROL DE TRÁFICO</b>				
Centro de Control de Tráfico. Se incluye la instalación de nodos de comunicaciones, servidores en cluster, servidores de grabación, servidores de cámaras, servidores de sistema de peaje, cliente de estación de trabajo, armarios tipo racks, software, cualquier tipo de licencias, la integración con cualquier centro de información viaria, así como la integración de todos los sistemas. Mano de obra y cualquier dispositivo para su correcto funcionamiento. Totalmente instalado y funcionando.	pa	3,6	1,0	3,6
<b>Dispositivos OBU's</b>				47

**TOTAL -94 m€**

Además, se incluyen en el estudio los costes de adquisición de los dispositivos OBU's para los residentes en la ciudad de Barcelona. Estos dispositivos se tendrán que actualizar y mantener por ello estimaremos que tendrán una vida útil de 5 años debido a los avances tecnológicos. Según datos de movilidad del Ayuntamiento de Barcelona en el año 2017 la ciudad de Barcelona contaba con un parque de turismos, furgonetas y camiones de 730.908 vehículos (ver Tabla 64).

a)

VEHICLES	2013*	2014	2015	2016	2017	%17/14	%17/16
Total	914.511	916.522	928.512	946.914	962.111	5,0%	1,6%
Turismes	564.194	564.700	570.345	580.399	587.966	-4,1%	1,3%
Motos	203.414	207.573	214.837	223.671	231.203	11,4%	3,4%
Ciclomotors	63.275	60.758	58.881	57.037	56.118	-7,6%	-1,6%
Furgonetes	41.875	42.869	43.948	45.390	46.250	7,9%	1,9%
Camions	22.044	21.171	22.044	20.522	20.366	-3,8%	-0,8%
Altres vehicles	19.709	19.451	19.738	19.895	20.308	4,4%	2,1%

b)

VELOCITAT (km/h)	2012	2013	2014	2015	2016	%16/13	%16/15
Vies connectivitat externa	23,6	23,5	22,9	s.d	28,7	22,0%	-
Vies mar-muntanya	16,8	17,1	17,0	s.d	13,0	-24,0%	-
Vies transversals	23,3	23,3	22,8	s.d	22,3	-4,3%	-
Mitjana de ciutat	20,9	21,0	20,6	s.d	21,8	3,6%	-
Rondes	59,9	59,5	59,2	s.d	48,4	-18,7%	-

Tabla 64. a) Número de vehículos en la ciudad de Barcelona. b) Evolución de la velocidad de circulación en Barcelona. Fuente: Ayuntamiento de Barcelona.

Se parte de la hipótesis de que el Ayuntamiento de Barcelona asumiría el coste inicial de un primer suministro de dispositivos OBU a todos los vehículos privados registrados en Barcelona (hipótesis del lado de la seguridad). Al mismo tiempo se supone que las motocicletas y ciclomotores estarían exentos del peaje, por tanto, no necesitarían estar equipadas con OBU. Se considera un coste del OBU de 70 €. En la siguiente tabla se muestra el coste para la administración del suministro de estos dispositivos OBU según las hipótesis consideradas:

Tarifa	Precio unidad OBU (€)	Coste adquisición OBU (m€)
P=9 cts/km	70	-47
P=16 cts/km	70	-47
P=30 cts/km	70	-47

#### b) Mantenimiento y operación del peaje urbano

Para el cálculo de estos costes nos hemos apoyado en información recabada por empresas mantenedoras de sistemas de tráfico, así como en los costes de mantenimiento de contratos que actualmente tiene la administración pública y que podrían tener porcentajes de costes similares. Es el caso del mantenimiento de los sistemas ITS de los accesos Sur y Norte de Barcelona gestionado por el Servei Català del Trànsit o del mantenimiento de los sistemas ITS de las rondas de Barcelona, gestionado por el Ayuntamiento de Barcelona. Con la información disponible se ha considerado estimar un coste de un 1,5% anual del coste de la inversión para el mantenimiento preventivo y un 2% anual para el mantenimiento correctivo de la nueva instalación de peaje. Se incluyen dentro de estos porcentajes los costes de mantenimiento de los

dispositivos OBU's suministrados a los residentes de la ciudad de Barcelona. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

Mantenimiento preventivo	-1 m€/Año
Mantenimiento correctivo	-2 m€/Año
<b><i>Mantenimiento peaje urbano</i></b>	<b>-3 m€/Año</b>

En cuanto a los costes de explotación y operación del centro de control se estiman en un 7% de los costes de inversión. El centro de control de peaje urbano dispondría de un conjunto de dependencias desde las cuales una serie de operadores gestionarían y explotarían el peaje urbano. En líneas generales este centro de control dispondría de una sala principal con “videowall” y monitores con puestos de trabajo para los operadores de sala, una sala con servidores donde se instalarían todos los sistemas informáticos necesarios para el funcionamiento del peaje, una sala de comunicaciones con su equipamiento necesario y salas de reuniones. Este centro de control podría estar interconectado con otros centros de control, como el centro de control semafórico de Barcelona, centro de control de los túneles de Vallvidrera, centro de control de los túneles de Barcelona y centro de control Civicat. Gracias a esta interconexión se podrían compartir datos de vehículos en tiempo real. Su coste anual se estima en un 7% del coste de inversión

<b><i>Explotación y operación del peaje urbano</i></b>	<b>-7 m€/Año</b>
--	------------------

A modo de comparación, el sistema de Oslo, que funciona desde hace unos 15 años, tiene un coste de operación de alrededor de 11 m€/año (Fjellinjen, 2004). En comparación con el sistema propuesto en nuestra tesis el sistema de peaje noruego es más intensivo en mano de obra y estaría menos automatizado que el planteado en nuestro trabajo. Además, nótese que los costes de operación datan del año 2004, y el presente trabajo se realiza en el 2019 y es evidente que ha habido un gran avance en la automatización de sistemas de control de tráfico.

Por otro lado, la Administración de Carreteras de Estocolmo, que es responsable del sistema de peaje urbano de Estocolmo, estima los costos operativos anuales del sistema en 23,1 m€. Dentro de esta cifra se incluye el mantenimiento necesario y las reinversiones, tales como la sustitución de cámaras y otros equipos, y costes adicionales tales como el movimiento de casetas de peajes.

### **12.10.5 Externalidades**

Para el cálculo de las externalidades hemos utilizado la metodología SAIT<sup>103</sup>, utilizada por la Dirección General de Infraestructuras de Movilidad Terrestre (DGIMT) de la Generalitat de Catalunya, aplicada sobre los veh-km ahorrados.

---

<sup>103</sup> SAIT (Sistema d'avaluació d'inversions del transport): El Sistema de Evaluación de Inversiones en Transporte (SAIT) es la metodología de referencia a utilizar a la hora de evaluar la rentabilidad socioeconómica de aquellas actuaciones impulsadas por la Dirección general de Infraestructuras de Movilidad Terrestre (DGIMT) en la Generalitat de Catalunya y que requieren de este tipo de análisis.

### **Cambio climático**

Para monetizar el efecto en el cambio climático antes y después de la aplicación del peaje, y con la ayuda del modelo de reparto modal, hemos calculado los vehículos-kilómetro día eliminados para las distintas situaciones de peaje y su valoración según SAIT:

	Veh-km/día eliminados	Coste marginal cambio climático €/veh-km, SAIT	Coste anual (m€)
P=9 cts/km	953.873	0,0104	2
P=16 cts/km	1.539.481	0,0104	4
P=30 cts/km	2.313.939	0,0104	6

**Tabla 65. Beneficio del ahorro en el cambio climático.**

### **Ruido**

Para monetizar el efecto en el ruido antes y después de la aplicación del peaje, se han tenido en cuentas los siguientes valores:

	Veh-km/día eliminados	Coste marginal ruido €/veh-km, SAIT	Coste anual (m€)
P=9 cts/km	953.873	0,0214	5
P=16 cts/km	1.539.481	0,0214	8
P=30 cts/km	2.313.939	0,0214	12

**Tabla 66. Beneficio del ahorro en el ruido.**

### **Reducción de la polución**

Para monetizar la polución generadas antes y después de la aplicación del peaje, se han tenido en cuentas los siguientes valores:

	Veh-km día eliminados	Coste marginal polución €/veh-km, SAIT	Coste anual (m€)
P=9 cts/km	953.873	0,0189	5
P=16 cts/km	1.539.481	0,0189	7
P=30 cts/km	2.313.939	0,0189	11

**Tabla 67. Beneficio del ahorro en la polución.**

#### **c) Incremento de la contaminación en el parque de autobuses urbanos**

La implementación del peaje urbano implicará un trasvase de viajes desde el vehículo privado hacia autobuses públicos. Este hecho implicara la necesidad de reforzar el parque de autobuses urbanos de la ciudad que provocaran un incremento de la polución y de gases contaminantes. Para evitar este efecto, se ha supuesto que el incremento del parque de autobuses necesario para reforzar el sistema de transporte público se realizará con autobuses híbridos o eléctricos. Por ello se ha obviado el potencial del impacto negativo del aumento del parque de autobuses que, en cualquier caso, será pequeño.

**d) Aumento en la seguridad en el tráfico**

Es probable que la implementación del peaje urbano pueda hacer disminuir la probabilidad de accidentes al reducir los vehículos en circulación. Este hecho ayudaría a aumentar la seguridad vial en la ciudad, aunque posiblemente de manera moderada. A pesar de ello, y para estar del lado de la seguridad, no consideraremos este efecto.

**12.10.6 Resultados del estudio socioeconómico para el primer año**

Una vez analizados todos los conceptos empleados para el análisis coste-beneficio del nuevo sistema de peaje urbano en Barcelona se presenta a continuación un desglose sintetizado con los resultados obtenidos para el primer año repercutiendo la inversión íntegramente este año. Indicar que en el presente estudio no se ha considerado el efecto del coste marginal en los fondos públicos.

1. Efectos del peaje urbano sobre el sistema de transporte (M€)	Tarifa del peaje		
	9 (cts/km)	16 (cts/km)	30(cts/km)
1.1. Variación del bienestar de los viajes en la red básica	116	186	220
1.2 Variación del bienestar de los viajes en la red secundaria	-4	-10	-21
1.3 Variación del bienestar de los viajes que pasan al transporte público	-30	-53	-74
1.4 Variación del bienestar de los viajes desplazados del área intra-rondas	-13	-27	-83
1.5 Ahorro de costes de funcionamiento del vehículo privado	24	42	58
1.6 Costes de inversión y operación del transporte público adicional para atender el cambio modal	-17	-30	-41
<b>Subtotal 1</b>	<b>76 m€</b>	<b>108 m€</b>	<b>59 m€</b>

2. Costes del sistema de peaje urbano (M€)	Tarifa del peaje		
	9 (cts/km)	16 (cts/km)	30(cts/km)
2.1 Inversión	-94	-94	-94
2.2 Mantenimiento del peaje urbano	-3	-3	-3
2.3 Explotación y operación del peaje urbano	-7	-7	-7
<b>Subtotal 2</b>	<b>-104 m€</b>	<b>-104 m€</b>	<b>-104 m€</b>

3. Externalidades (M€)	Tarifa del peaje		
	9 (cts/km)	16 (cts/km)	30(cts/km)
3.1 Cambio climático	2	4	6
3.1 Polución	5	7	11
3.2 Ruido	5	8	12
<b>Subtotal 3</b>	<b>12 m€</b>	<b>19 m€</b>	<b>29 m€</b>

4. Efecto del peaje urbanos sobre la salud de las personas (M€)	Tarifa del peaje		
	9 (cts/km)	16 (cts/km)	30(cts/km)
4.1 Aumento del tiempo caminando	21	37	51
<b>Subtotal 4</b>	<b>21 m€</b>	<b>37 m€</b>	<b>51 m€</b>

**Tabla 68. Desglose de los beneficios y costes en millones de euros para el primer año del sistema de peaje urbano en Barcelona.**

A continuación, se presenta un cuadro resumen con los resultados obtenidos:

	Tarifa del peaje		
	9 (cts/km)	16 (cts/km)	30(cts/km)
<b>1. Efectos del peaje urbano sobre el sistema de transporte</b>	76	108	59
<b>2. Costes del sistema de peaje urbano</b>	-104	-104	-104
<b>3. Externalidades</b>	12	19	29
<b>4. Efecto del peaje urbanos sobre la salud de las personas</b>	21	37	51
<b>Beneficio total neto el primer año (m€)</b>	<b>5 m€</b>	<b>60 m€</b>	<b>35 m€</b>

**Tabla 69 Resumen de los beneficios y costes en millones de euros para el primer año del sistema de peaje urbano en Barcelona.**

Observamos que, para cualquier escenario tarifario, el resultado es positivo, a pesar de que hemos repercutido toda la inversión del proyecto al primer año. A partir de este escenario vamos a llevar a cabo un análisis de sensibilidad de los efectos de mayor impacto sobre el beneficio neto final del proyecto en el primer año. Posteriormente, realizaremos el análisis socioeconómico a largo plazo, para un periodo de 10 años, con el fin de calcular ciertos indicadores económicos, como la tasa interna de retorno (TIR) o el valor actualizado neto (VAN) que nos sirven, para analizar la rentabilidad de la inversión. Finalizaremos realizando un análisis de riesgo sobre la rentabilidad socioeconómica del proyecto para el periodo de 10 años.

#### **12.10.7 Análisis de sensibilidad del estudio socioeconómico para el primer año**

Como se ha comentado, podemos comprobar que los tres escenarios planteados arrojan resultados positivos ya el primer año y, lógicamente, una rentabilidad socioeconómica muy elevada. No obstante, en dicho estudio hemos utilizado una serie de parámetros, como el valor del tiempo y porcentajes del reparto modal que pueden ser cuestionados porque provienen de estudios realizados para otros proyectos de movilidad, así como algunos factores claves en el análisis, como los costes de inversión que requerirían de un proyecto detallado para su correcta valoración. Para llevar a cabo un análisis de la fiabilidad de los resultados del estudio haremos unas suposiciones sobre la posible distribución estadística de los parámetros y valores claves del análisis coste-beneficio para ver cómo afectan a los indicadores de rentabilidad. Para ello aplicaremos el método de Montecarlo con la ayuda del software @Risk. Los distintos factores se convierten en variables aleatorias que tienen asignada una función de probabilidad con un rango de valores centrados al adoptado en el análisis de referencia. La varianza de las funciones probabilísticas utilizadas se ha definido con criterios de razonabilidad, a partir de la experiencia de algunos expertos consultados. Se comenta a continuación cómo se han establecido las funciones del análisis de riesgo:

- 1) *Valor de tiempo (€/h)*: en la resolución general del problema se ha optado por adoptar un valor medio del tiempo de viaje de 10,8 €/h. Se ha llegado a este valor realizando la media ponderada de los distintos valores del tiempo de viaje utilizados en el estudio Trambaix y Trambesós 2009 (ver Tabla 36), para los diferentes tipos de movilidad (ocupacional, vuelta a casa y personal). Aplicar

este valor del tiempo, tanto en ahorros como en pérdidas de tiempo, es conservador desde el punto de vista del beneficio socioeconómico del proyecto. No obstante, para el análisis de sensibilidad fijaremos unos rangos probables de este valor con el fin de definir un intervalo de confianza del resultado del proyecto. A pesar de que la función que mejor se adapta a los valores de tiempo de viaje es la lognormal (Turró, 1979), la función probabilística adoptada es la Pert<sup>104</sup>. A continuación, se indican los rangos de los distintos valores de tiempos utilizados:

- *Valor de tiempo (€/h) de los conductores que utilizan el peaje urbano.* En este caso vamos a suponer que el hecho de utilizar el peaje urbano implica un mayor valor de su tiempo. Probablemente el motivo de viaje de los usuarios del peaje sea por gestiones de trabajo o por movilidad ocupacional de acceso o retorno al trabajo. Partiendo de esta premisa y basándonos en la (Tabla 36) usaremos un valor mínimo de tiempo para estos conductores de 10,7 €/h, un valor máximo de 15,7 €/h y la media de ambos como valor más probable.
- *Valor de tiempo (€/h) para los conductores que no utilizan el peaje urbano,* pasan al transporte público o salen del área intra-rondas. Supondremos que la valoración del tiempo de estos conductores será inferior a la de los conductores que optan por pagar el peaje. En este caso posiblemente el motivo de estos viajes esté relacionado con el tiempo libre, compras o incluso ida o vuelta del trabajo. Por ello, basándonos en la (Tabla 36), el rango de valores que usaremos será un valor mínimo de 7,3 €/h, un valor máximo de 10,7 €/h y la media de ambos para el valor más probable.

- 2) *Porcentaje de los conductores que pasan del vehículo privado al transporte público:* el modelo de reparto modal utilizado nos ha dado como resultado una serie de porcentajes de uso para los diferentes modos de transporte en función de la tarifa aplicada. No obstante, como se ha indicado, al no disponer de las matrices origen-destino de reparto modal de la ciudad de Barcelona hemos tenido que realizar una serie de aproximaciones. Este hecho deriva en cierta incertidumbre sobre el resultado, por lo que definiremos este porcentaje con una variable aleatoria. Partiremos de la hipótesis de que esta variable se moverá dentro de un rango probable porcentual de conductores que pasarían al transporte público. Definiremos también una función tipo Pert con un rango de viajes traspasados al transporte público entre el 50% y 100% sobre el total de viajes que pasan desde la red básica hacia la red secundaria. Para definir el valor mínimo de este rango, como ya se ha comentado, nos hemos basado en el estudio realizado en diciembre de 2019 por el RACC sobre el impacto de la zona de bajas emisiones de Barcelona en la demanda de transporte público. Se utilizará como valor más probable la moda de los viajes traspasados. Este porcentaje lo aplicaremos sobre el número de viajes transferidos desde la red básica a la red secundaria, según nuestro modelo

---

<sup>104</sup> La función de densidad de probabilidad Pert es similar a la triangular, pero con sus colas suavizadas. Presenta un valor mínimo (a), máximo (b) y una moda (c) de modo que es 0 para los extremos (a, b), y sensiblemente afín entre cada extremo y la moda.

de tráfico para cada escenario tarifario (ver Tabla 70). La Figura 102 muestran la función de distribución de probabilidades para los diferentes escenarios tarifarios.

	Viajes diarios transferidos de la red básica a la red secundaria ( $\cdot 10^3$ )	Valor más probable "moda" de viajes transferidos ( $\cdot 10^3$ )	Valor mínimo de viajes transferidos ( $\cdot 10^3$ )	Valor máximo de viajes transferidos ( $\cdot 10^3$ )
P=9 cts/km	123	103	61	123
P=16 cts/km	213	181	106	213
P=30 cts/km	291	253	146	291

Tabla 70. Número de viajes transferidos desde la red básica a la red secundaria según el modelo de tráfico y valores empleados para el análisis de sensibilidad.

- 3) *Inversión (M€)*: el presupuesto de inversión del proyecto se ha realizado consultando a diferentes proveedores y empresas integradoras de sistemas de control de tráfico que, en función de sus experiencias, nos han orientado en el desarrollo del presupuesto. Este resultado no deja de tener cierta incertidumbre, tanto al alza como a la baja, ya que probablemente durante la ejecución del proyecto salgan imprevistos no contemplados. Es posible incluso que los contratistas del proyecto puedan conseguir ahorros en materiales por descuentos con sus proveedores habituales. Por este motivo, definiremos a la inversión como una variable aleatoria con un rango de valores que oscilaría entre un valor mínimo de 80 m€, máximo de 110 m€ y, como valor más probable, el valor del análisis de referencia. Este rango corresponde a una variación de alrededor de 20% con respecto al valor más probable, horquilla suficiente para acotar el riesgo. La Figura 103 muestra la función de distribución de probabilidad utilizada.

A continuación de muestra tabla resumen con los valores probabilísticos utilizados:

VARIABLES ALEATORIAS	Valor más probable (moda)	Valor mínimo	Valor máximo
(Valor del tiempo (€/h) de viajes que utilizan el peaje urbano) <sup>105</sup>	13,2	10,7	15,7
(Valor del tiempo (€/h) de viajes que no utilizan el peaje urbano) <sup>106</sup>	9	7,3	10,7
(Porcentaje de viajes que pasan del vehículo privado al transporte público (%)) <sup>107</sup>	(84/85/87) <sup>108</sup>	50	100
Número de viajes diarios que pasan al transporte público para la tarifa de 9 cts/km ( $\cdot 10^3$ )	103	61	123

<sup>105</sup> El rango de valores utilizados es el presentado en la Tabla 36 según encuestas entre usuarios de Trambaix y Trambesòs 2009.

<sup>106</sup> El rango de valores utilizados es el presentado en la Tabla 36 según encuestas entre usuarios de Trambaix y Trambesòs 2009.

<sup>107</sup> Se toma como valor más probable del porcentaje de conductores desalojados hacia el transporte público obtenido en el modelo de reparto modal. Se estima una horquilla de valores probables entre el 50% y el 100% de conductores que podrían cambiar su modo de transporte en vehículo privado hacia el transporte público.

<sup>108</sup> Representan los porcentajes de viajes traspasados al transporte público para cada situación de peaje según la estimación realizada por el modelo de reparto modal. Los porcentajes de 84%, 85% y 87% corresponden a los escenarios tarifario de 9 cts/km, 16 cts/km y 30 cts/km, respectivamente.

VARIABLES ALEATORIAS	Valor más probable (moda)	Valor mínimo	Valor máximo
Número de viajes diarios que pasan al transporte público para la tarifa de 16 cts/km (*10 <sup>3</sup> )	181	106	212
Número de viajes diarios que pasan al transporte público para la tarifa de 30 cts/km (*10 <sup>3</sup> )	254	146	291
Inversión (M€) <sup>109</sup>	94	80	110

Tabla 71. Resumen del rango de valores de las variables aleatorias definidas.

Una vez hemos definidos los rangos de valores de las variables aleatorias asignaremos a cada factor clave su respectiva función de densidad de probabilidad, que en nuestro caso serán funciones tipo Pert. Las siguientes figuras muestran las funciones empleadas:

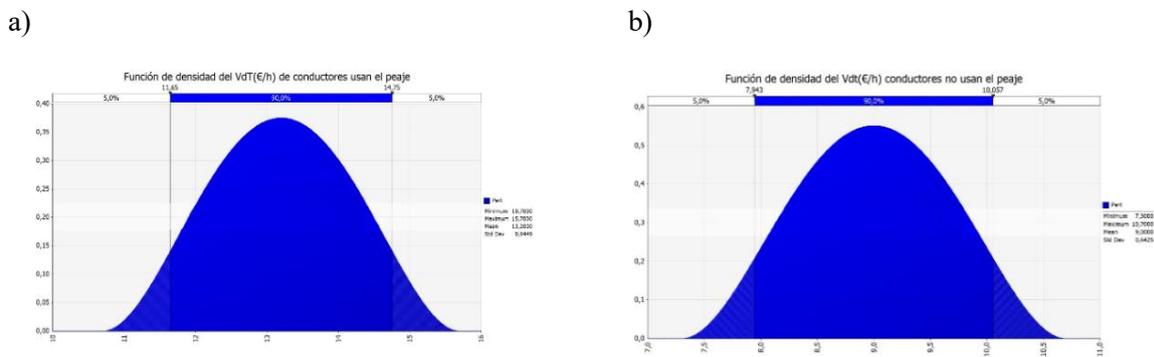


Figura 101. Función de distribución de probabilidad Pert para el valor del tiempo: a) de los conductores que usan el peaje, b) de los conductores que no usan el peaje.

a) P= 9 cts/km

b) P= 16 cts/km

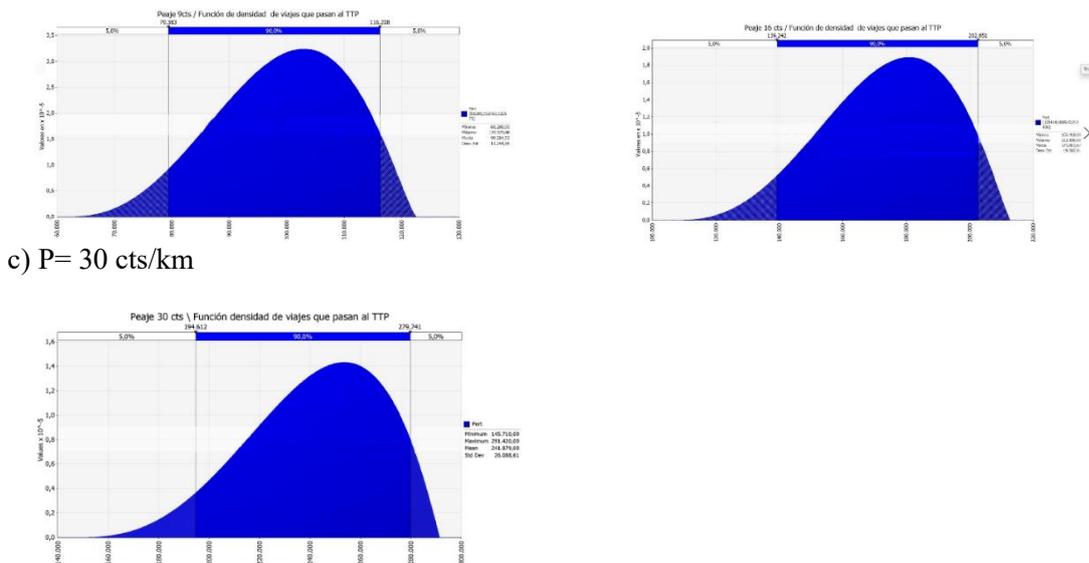


Figura 102. Función de distribución de probabilidad Pert del número de viajes que pasan al transporte público para los distintos escenarios tarifarios.

<sup>109</sup> Se estima como valor más probable de inversión el calculado en el análisis de referencia con un rango que iría entre los 80 y los 110 m€.

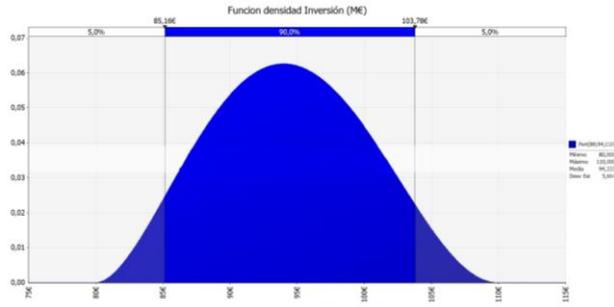
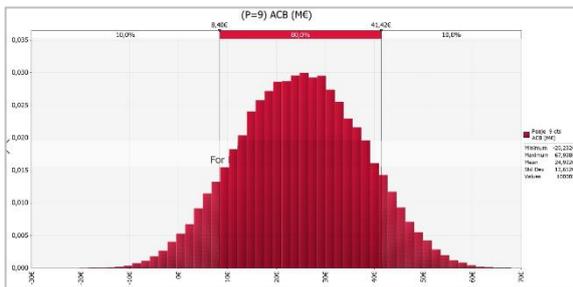


Figura 103. Función de distribución de probabilidad Pert utilizada para la inversión.

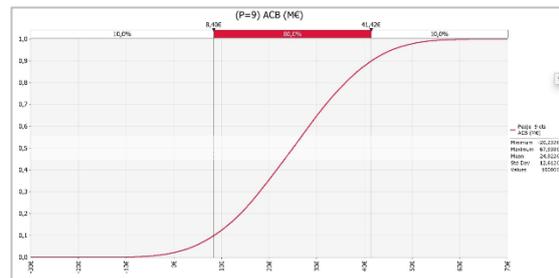
Para cada distribución de probabilidad se han realizado diferentes muestreos (método de Montecarlo) con los que se ha recalculado todo el análisis coste-beneficio, cada vez con un grupo diferentes de valores posibles. Se han realizado 100.000 iteraciones, con los diferentes valores tomados de forma aleatoria dentro de la función probabilística descrita, obteniendo un histograma de resultados para el primer año y para cada escenario de peaje.

A continuación, mostramos gráficos con los resultados de las diferentes simulaciones realizadas para los tres escenarios tarifarios:

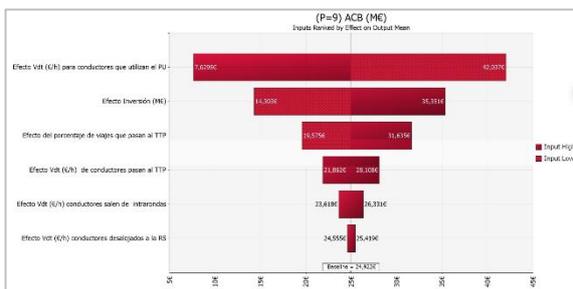
a) Histograma de beneficios



b) Función de distribución acumulada



c) Efecto de cada variable sobre el beneficio



d) Contribución a la varianza de cada variable

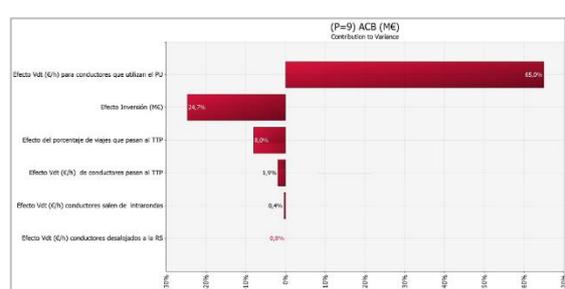
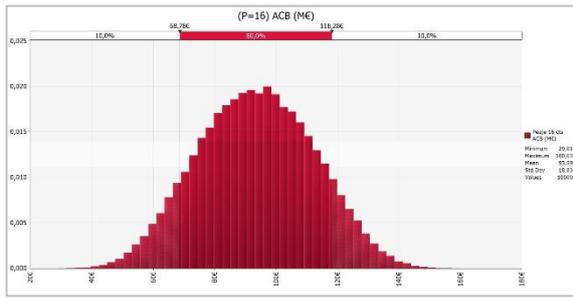
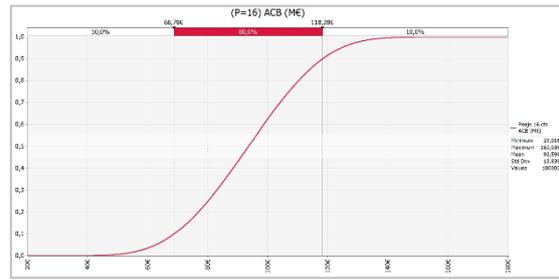


Figura 104. Resultados estadísticos para el escenario tarifario de 9 cts/km

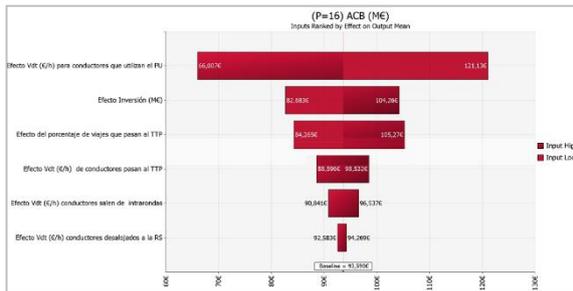
a) Histograma de beneficios



b) Función de distribución acumulada



c) Efecto de cada variable sobre el beneficio



d) Contribución a la varianza de cada variable

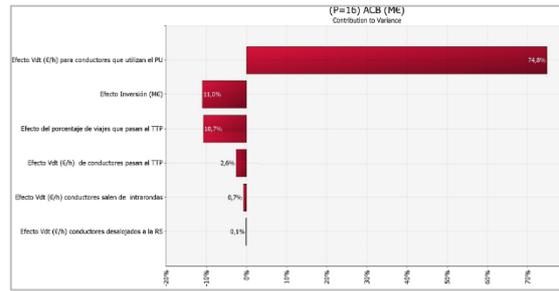
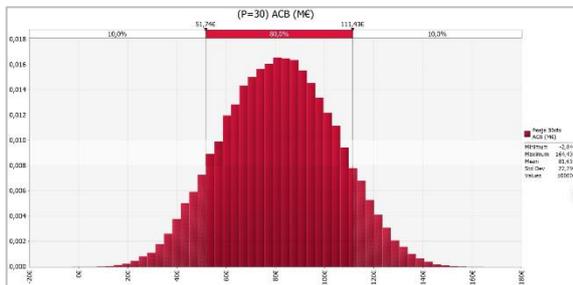
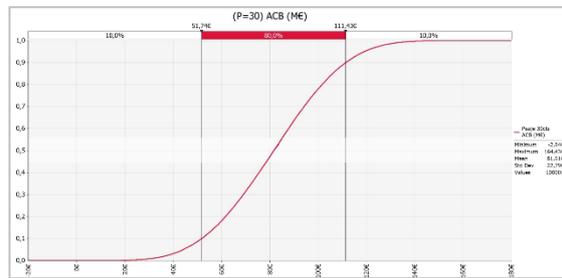


Figura 105. Resultados estadísticos para el escenario tarifario de 16 cts/km

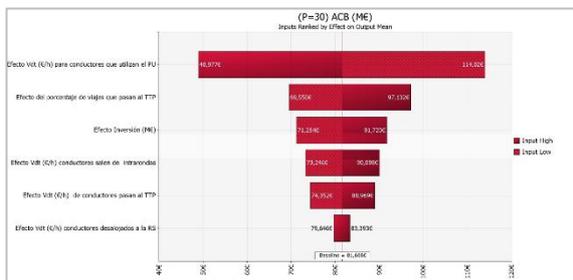
a) Histograma de beneficios



b) Función de distribución acumulada



c) Efecto de cada variable sobre el beneficio



d) Contribución a la varianza de cada variable

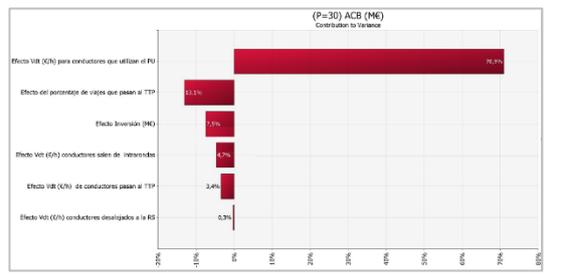


Figura 106. Resultados estadísticos para el escenario tarifario de 30 cts/km

### 12.10.7.1 Conclusiones del análisis de sensibilidad para el primer año

Si analizamos los resultados del proyecto a corto plazo, podemos concluir que, con una probabilidad del 80%, cualquier escenario tarifario generaría resultados socioeconómicamente positivos ya el primer año (ver Tabla 72). Cabe destacar que la tarifa superior de 30 cts/km logra resultados socioeconómicos inferiores a los de la tarifa de 16 cts/km, probablemente porque la mayor congestión que genera en la red secundaria no compensa los ahorros de tiempo obtenidos por los usuarios de la red básica.

	Rango de resultado socioeconómico para una probabilidad de ocurrencia del 80%	
	Valor mínimo (M€)	Valor máximo (M€)
P=9 cts/km	8	41
P=16 cts/km	69	118
P=30 cts/km	51	111

**Tabla 72. Rango de beneficios socioeconómicos durante el primer año con una probabilidad de ocurrencia del 80%**

Por otro lado, analizando los resultados podemos ver que la variable que mayor impacto tiene sobre la contribución a la varianza del resultado es el valor del tiempo de los conductores que utilizan el peaje, en segunda posición la inversión, aunque sólo para las dos tarifas inferiores, se observa que para la mayor de las tarifas la inversión es relegada a una tercera posición, a favor del efecto de los viajes que pasan al transporte público. Del mismo modo, apreciamos como, a medida que va aumentando la tarifa, el impacto del efecto de la inversión sobre el resultado se va diluyendo. También destacar que, mientras para las tarifas de 9 y 16 cts. la cuarta posición con mayor impacto sobre la varianza del resultado es el efecto de los viajes transferidos al transporte público, para la tarifa de 30 cts. esta cuarta posición es para el efecto de los conductores que se transfieren al área extra-rondas; probablemente la saturación de la red secundaria obliga a los conductores a buscar alternativas de mayor distancia, pero gratuitas. Este efecto se puede observar viendo las Figura 104c) Figura 105c) y Figura 106c), donde se ve el efecto a nivel monetario, y en Figura 104d) Figura 105d) y Figura 106d) donde se ve el mismo efecto en tanto por ciento sobre la contribución de la varianza.

### 12.10.8 Resultados del estudio socioeconómico para un periodo de 10 años

Una vez analizadas las posibles casuísticas de resultados para el primer año, en la hipótesis de que se repercute íntegramente el valor de la inversión del proyecto a este año, se va a realizar un análisis convencional con un ciclo de proyecto de 10 años a partir de los valores probables del anterior apartado. Para ello vamos a suponer que la construcción del sistema de peaje urbano se realizará en dos años y que el tráfico permanecerá constante los tres primeros años, y después irá aumentando un 1% anual. A continuación, se muestran los resultados obtenidos utilizando una tasa de descuento del 10%:

a) Escenario tarifario 9 cts/km

	VAN (m€)	AÑOS									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>1. EFECTO SOBRE EL TRANSP. DERIVADOS DE LA IMPLANTACIÓN DEL PU</b>	429	0	0	96	99	104	107	111	109	103	98
1.1. Ahorro del tiempo de los viajeros en VP que utilizan el PU				142	142	141	138	134	128	122	116
1.2. Pérdida de bienestar de los viajeros en VP que no usan el PU				-3	-3	-2	-1	-1	-0	-0	-0
1.3. Pérdida de bienestar de los viajeros en VP que pasan al TP				-24	-22	-16	-11	-4	-1	-0	-0
1.4. Viajeros desplazados del área intra-rondas				-11	-11	-11	-11	-11	-11	-12	-12
1.5. Ahorro de costes de funcionamiento del VP				13	13	13	13	13	13	14	14
1.6. Costes de inversión y operación del TP adicional para atender el cambio modal				-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
<b>2. COSTES DEL SISTEMA DE PEAJE URBANO</b>	-151	-57	-38	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10
2.1. Inversión		-57	-38								
2.2. Mantenimiento del peaje urbano		0	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
2.3. Explotación y operación del peaje urbano		0	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7
<b>3. EXTERNALIDADES</b>	30	0	0	12	12	12	12	12	13	13	13
3.1. Cambio climático				2	2	2	3	3	3	3	3
3.2. Polución				5	5	5	5	5	5	5	5
3.3. Ruido				5	5	5	5	5	5	5	6
<b>4. EFECTO SOBRE LA SALUD DE LAS PERSONAS</b>	76	0	0	21	21	22	22	23	24	25	27
4.1. Aumento del tiempo caminando				21	21	22	22	23	24	25	27
<b>BENEFICIO (m€)</b>		-57	-38	119	122	127	132	136	135	132	128
VAN (m€)	384M€										
TIR (10 años)	86%										

Tabla 73. Resultados rentabilidad socioeconómica del proyecto a 10 años para T=9 cts/km. Elaboración propia.

b) Escenario tarifario 16 cts/km

	VAN (m€)	AÑOS									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>1. EFECTO SOBRE EL TRANSP. DERIVADOS DE LA IMPLANTACIÓN DEL PU</b>	660	0	0	141	146	155	163	170	167	159	150
1.1. Ahorro del tiempo de los viajeros en VP que utilizan el PU				227	227	225	220	214	205	195	185
1.2. Pérdida de bienestar de los viajeros en VP que no usan el PU				-8	-7	-5	-4	-1	-0	-0	-0
1.3. Pérdida de bienestar de los viajeros en VP que pasan al TP				-43	-38	-29	-19	-7	-2	-1	-0
1.4. Viajeros desplazados del área intra-rondas				-23	-23	-23	-23	-23	-24	-24	-25
1.5. Ahorro de costes de funcionamiento del VP				23	23	23	23	23	23	24	25
1.6. Costes de inversión y operación del TP adicional para atender el cambio modal				-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35
<b>2. COSTES DEL SISTEMA DE PEAJE URBANO</b>	-151	-57	-38	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10
2.1. Inversión		-57	-38								
2.2. Mantenimiento del peaje urbano		0	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
2.3. Explotación y operación del peaje urbano		0	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7
<b>3. EXTERNALIDADES</b>	63	0	0	20	20	20	20	20	20	21	22
3.1. Cambio climático				4	4	4	4	4	4	4	4
3.2. Polución				7	7	7	7	7	8	8	8
3.3. Ruido				8	8	8	8	8	9	9	9
<b>4. EFECTO SOBRE LA SALUD DE LAS PERSONAS</b>	152	0	0	37	37	38	39	41	42	45	47
4.1. Aumento del tiempo caminando				37	37	38	39	41	42	45	47
<b>BENEFICIO (m€)</b>		-57	-38	188	193	203	212	220	220	215	209
VAN (m€)	725M€										
TIR (10 años)	119%										

Tabla 74. Resultados rentabilidad socioeconómica del proyecto a 10 años para T=16 cts/km. Elaboración propia.

c) Escenario tarifario 30 cts/km

	VAN (m€)	AÑOS									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>1. EFECTO SOBRE EL TRANSP. DERIVADOS DE LA IMPLANTACIÓN DEL PU</b>	547	0	0	105	113	128	140	152	150	140	128
1.1. Ahorro del tiempo de los viajeros en VP que utilizan el PU				269	269	266	261	253	243	231	219
1.2. Pérdida de bienestar de los viajeros en VP que no usan el PU				-17	-15	-12	-8	-3	-1	-0	-0
1.3. Pérdida de bienestar de los viajeros en VP que pasan al TP				-59	-53	-40	-26	-10	-3	-1	-0
1.4. Viajeros desplazados del área intra-rondas				-69	-69	-69	-70	-71	-72	-74	-77
1.5. Ahorro de costes de funcionamiento del VP				31	31	31	32	32	33	34	35
1.6. Costes de inversión y operación del TP adicional para atender el cambio modal				-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49
<b>2. COSTES DEL SISTEMA DE PEAJE URBANO</b>	-151	-57	-38	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10
2.1. Inversión		-57	-38								
2.2. Mantenimiento del peaje urbano		0		-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
2.3. Explotación y operación del peaje urbano		0		-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7
<b>3. EXTERNALIDADES</b>	108	0	0	29	29	29	30	30	31	31	33
3.1. Cambio climático				6	6	6	6	6	6	6	7
3.2. Polución				11	11	11	11	11	11	11	12
3.3. Ruido				12	12	12	13	13	13	13	14
<b>4. EFECTO SOBRE LA SALUD DE LAS PERSONAS</b>	220	0	0	51	52	53	54	56	59	62	65
4.1. Aumento del tiempo caminando				51	52	53	54	56	59	62	65
<b>BENEFICIO (m€)</b>		-57	-38	176	184	200	214	228	230	223	216
VAN (m€)	723M€										
TIR (10 años)	116%										

Tabla 75. Resultados rentabilidad socioeconómica del proyecto a 10 años para T=30 cts/km. Elaboración propia

Con los resultados obtenidos, podemos graficar la evolución de la rentabilidad socioeconómica del proyecto frente a la tarifa. En la Figura 107 se concluye que tras agregar la línea de tendencia de los indicadores (relaciones cuadráticas) encontramos que la tarifa que logra el valor máximo de bienestar social podría estar alrededor de los 22 cts/km.

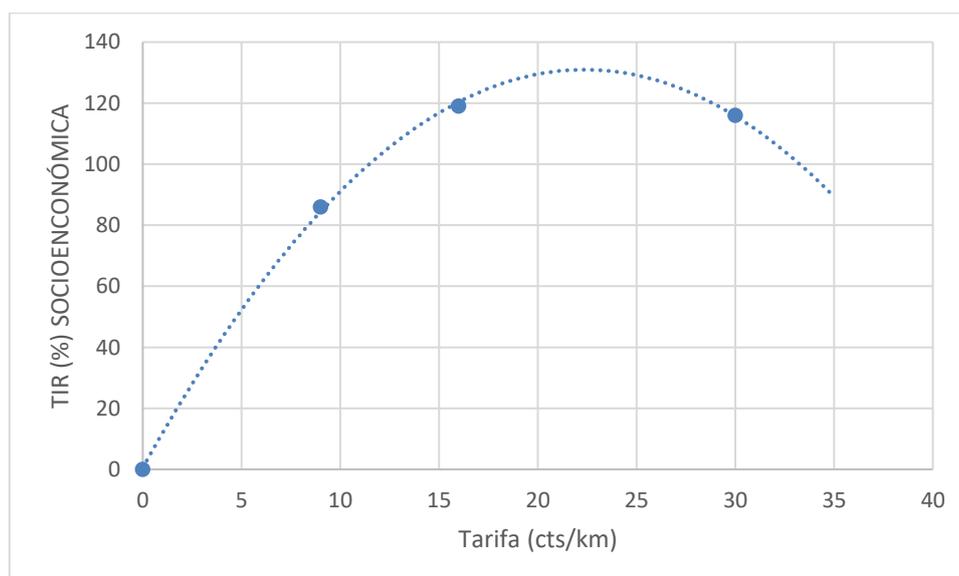


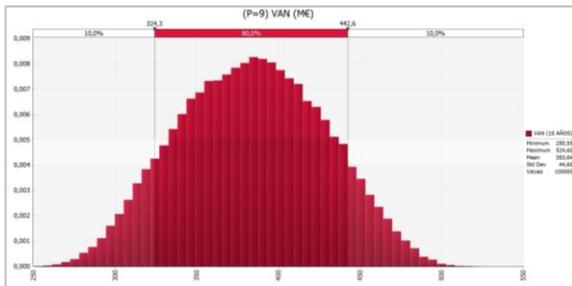
Figura 107. Evolución de la rentabilidad socioeconómica en función de la tarifa para un periodo de 10 años. Fuente: Elaboración propia

### 12.10.9 Análisis de sensibilidad para un ciclo del proyecto de 10 años

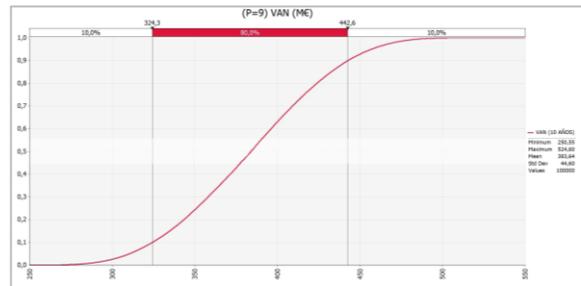
Del mismo modo, con los mismos parámetros de riesgo utilizados en el análisis socioeconómico durante el primer año, analizamos la rentabilidad socioeconómica del proyecto en un ciclo de 10 años aplicando una simulación de Montecarlo. A continuación, presentamos los histogramas de la VAN y TIR de los resultados obtenidos:

- Escenario tarifario de 9 cts/km

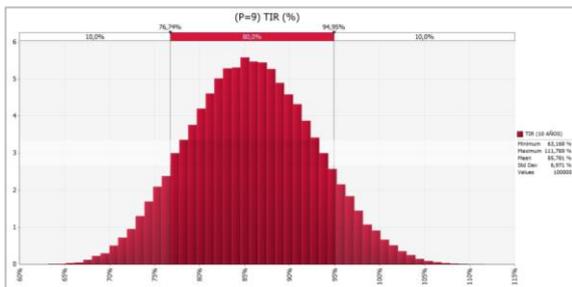
a) Histograma del VAN (m€)



b) Función de distribución acumulada VAN



c) Histograma del TIR (%)



d) Función de distribución acumulada TIR

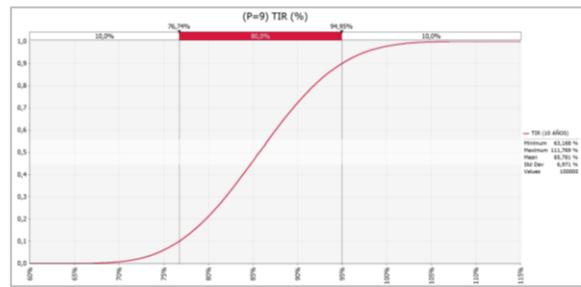
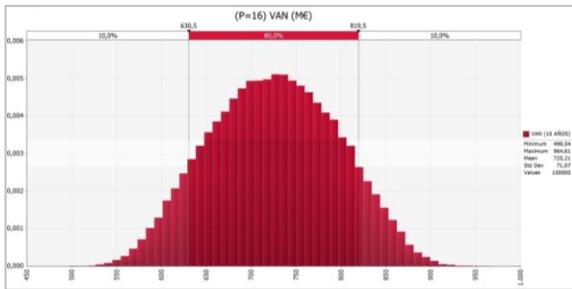


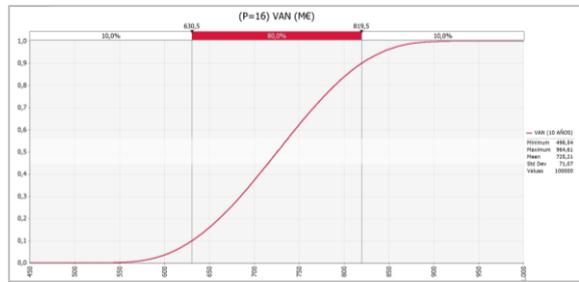
Figura 108. Histograma y función de distribución acumulada del VAN y TIR para una tarifa de peaje de 9 cts/km.

- Escenario de peaje de 16 cts/km

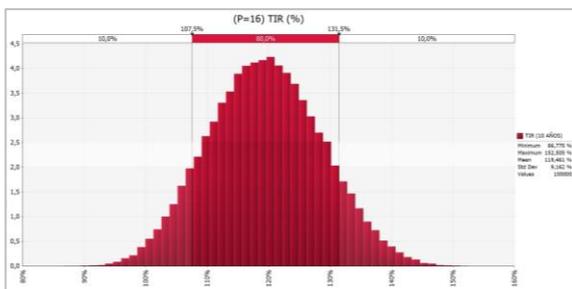
a) Histograma del VAN (m€)



b) Función de distribución acumulada VAN



c) Histograma del TIR (%)



d) Función de distribución acumulada TIR

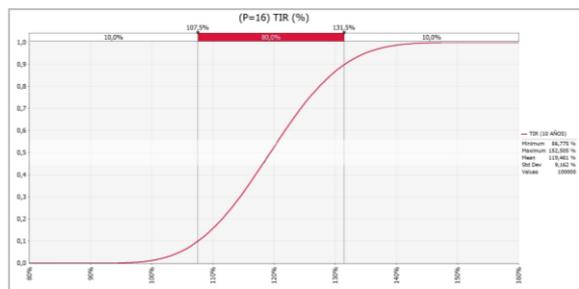
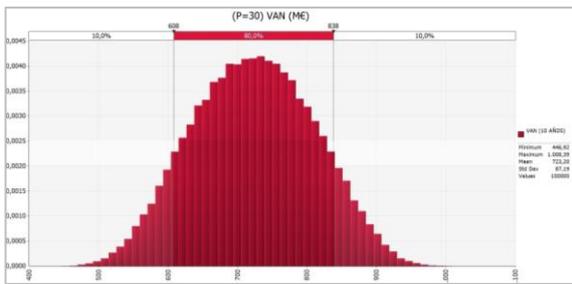


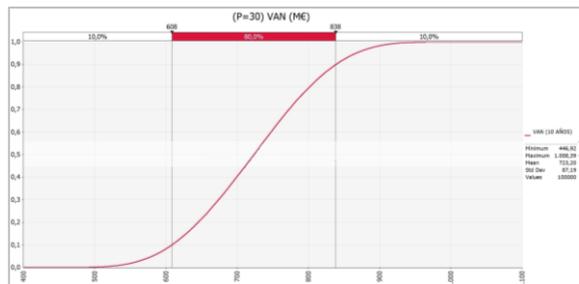
Figura 109. Histograma y función de distribución acumulada del VAN y TIR para una tarifa de peaje de 16 cts/km.

- Escenario de peaje de 30 cts/km

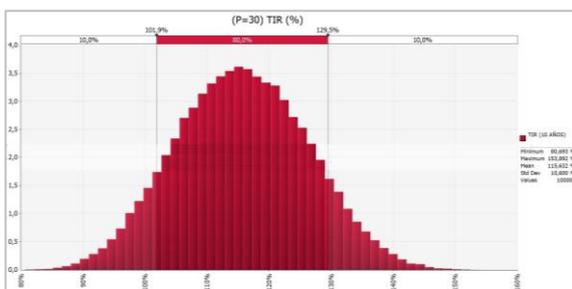
a) Histograma del VAN (m€)



b) Función de distribución acumulada VAN



c) Histograma del TIR (%)



d) Función de distribución acumulada TIR

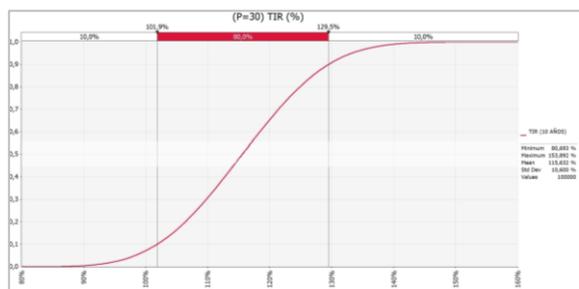


Figura 110. Histograma y función de distribución acumulada del VAN y TIR para una tarifa de peaje de 30 cts/km.

### **12.10.9.1 Conclusiones del análisis de sensibilidad para un ciclo de 10 años**

A la vista de los resultados obtenidos, podemos decir que cualquier esquema tarifario propuesto es socioeconómicamente muy rentable. Cabe indicar que, con la tarifa superior de 30 cts/km, se logran menores rentabilidades sociales que con la de 16 cts/km. Este hecho muy probablemente es debido a la mayor congestión vial que esta tarifa genera en la red secundaria de manera que los ahorros de tiempo conseguidos en la red básica no compensan la pérdida de bienestar de aquellos viajeros que se ven obligados a cambiar de modo de transporte o a variar sus rutas a través de recorridos gratuitos más largos.

### **12.11 Análisis financiero del proyecto**

En este apartado pasaremos a analizar la rentabilidad del proyecto desde el punto de vista financiero. Trataremos de identificar y sistematizar la información de carácter monetario (inversión, ingresos y costes) con el fin de evaluar el proyecto y determinar su viabilidad y rentabilidad financiera para los tres escenarios tarifarios.

Al igual que para el análisis socioeconómico estimamos una inversión inicial de 94 m€, adicionalmente añadiremos un 5% a esta inversión para atender a posibles modificaciones del proyecto. Partimos de la hipótesis de que el Ayuntamiento de Barcelona dispone de fondos propios para realizar la inversión. La tasa financiera de descuento considerada será de un 10%. La construcción del proyecto se realizaría en 2 años con una planificación de ejecución del 60% el primer año y del 40% el segundo año. Para el estudio de los flujos de caja de los distintos agentes, se consideran los gastos de explotación y mantenimiento del peaje urbano, la pérdida de ingresos por la tasa de combustible, el incremento de los costes de transporte y las exenciones en la tarifa, anteriormente calculados. Por último, en cuanto a los flujos de tráfico para el periodo de 10 años, se estima que el tráfico permanece constante durante los 3 primeros años de servicio del peaje, posteriormente va progresando positivamente a razón de un 1% cada dos años para estabilizarse durante los 3 últimos años.

A continuación, se plantean los ingresos y gastos del proyecto del primer año para posteriormente proyectarlo para un periodo de 10 años.

#### **12.11.1 Ingresos y gastos para la administración**

En cuanto a los costes e ingresos que tendría para la administración la implementación del peaje urbano en Barcelona hemos considerados que se puede acometer la inversión sin necesidad de recurrir a fórmulas para la financiación del proyecto como, por ejemplo, una concesión, una posibilidad que valdría la pena analizar con cierto detenimiento.

**a) Ingresos por peajes**

La aplicación de la tasa por congestión generaría a la administración un aumento de ingresos provenientes del peaje urbano. En el presente estudio no se consideran los ingresos adicionales de la recaudación de multas de posibles conductores infractores. Teniendo en cuenta los datos obtenidos de las simulaciones, en lo referente a vehículos-kilómetros que circularían por la red de peaje, se cuantifican los ingresos recaudados por el peaje. Suponemos que el peaje urbano estará operativo 250 días al año y que la recaudación podría sufrir una disminución del 25% debido a impagos. A continuación, se muestran los resultados tras aplicar las hipótesis mencionadas:

Días equivalentes de operación	250
Porcentaje de impagos	25%
Recaudación anual (tarifa 0,09 €/km)	166 m€
Recaudación anual (tarifa 0,16 €/km)	268 m€
Recaudación anual (tarifa 0,30 €/km)	439 m€

**Tabla 76. Recaudación anual para el primer año por la aplicación de la tasa por congestión.**

**b) Pérdida de ingresos por la tasa de combustible**

A partir de los vehículos-kilómetros dejados de hacer que pasarían al transporte público, calculados en apartados anteriores, podemos calcular el ahorro de combustible anual que podría generar el peaje urbano para las distintas tarifas:

	Ahorro combustible anual (Millones de litros/año)
P=9 cts/km	17
P=16 cts/km	30
P=30 cts/km	43

**Figura 111. Volumen de combustible ahorrado al año por el peaje urbano**

Si tenemos en cuenta los impuestos recaudados por las administraciones por el consumo de combustible, desglosados en la Figura 112 podemos tener una idea de la pérdida de ingresos por este concepto. En la Tabla 77 se muestran los resultados obtenidos.

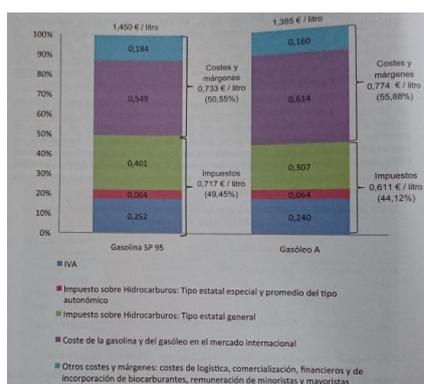


Figura 112. Composición del precio del litro de combustible en España. Fuente: Análisis para una justa aplicación de la Directiva Euroviñeta. José Manuel Vasallo et al.

	Recaudación anual (Millones litros/año)
P=9 cts/km	-11 m€
P=16 cts/km	-19 m€
P=30 cts/km	-24 m€

Tabla 77. Pérdida de ingreso por combustible

### c) Gastos de mantenimiento y operación

Estos gastos han sido cuantificados en el apartado anterior y son los siguientes:

#### - **Mantenimiento del sistema**

Estimamos unos costes para el mantenimiento preventivo de las instalaciones de un 1,5% anual del coste de la inversión. Para el mantenimiento correctivo se estima un coste de un 2% anual del coste de la inversión.

**Total**

**-3 m€/Año**

#### - **Explotación y operación del centro de control de tráfico**

Estimamos unos costes anuales de explotación y operación de un 7% del coste de inversión.

**Total**

**-7 m€/Año**

### d) Incremento de costes de transporte público

Estos costes han sido calculados en apartados anteriores. No obstante, para el análisis financiero, se incluyen los costes de seguros e impuestos relacionados con la posesión del vehículo (entre los que se deben considerar el impuesto de circulación, el impuesto sobre las actividades económicas (IAE), las revisiones de los sistemas de seguridad y otras tasas obligatorias para los vehículos).

	Coste seguro anual autobús (m€/año)	Coste seguro anual medios ferroviarios (m€/año)
P=9 cts/km	-0,4	-0,2
P=16 cts/km	-0,7	-0,3
P=30 cts/km	-0,9	-0,4

Tabla 78. Coste anual seguros para autobús y medios ferroviarios.

A continuación, se adjuntan los costes totales del incremento de transporte público adicional:

	Costes totales (m€/año)
P=9 cts/km	-20
P=16 cts/km	-36
P=30 cts/km	-50

Tabla 79. Incremento de coste debido al transporte público adicional.

**e) Impacto financiero en la recaudación de párquines municipales**

En nuestro modelo de tráfico no hemos considerado el impacto en el tráfico producido por la eliminación total de los aparcamientos en superficie. Este estudio de detalle se plantearía en futuras líneas de investigación. Por ello, no hemos tenido en cuenta el impacto financiero derivado de la eliminación de la recaudación de los párquines municipales en superficie.

**f) Política de exenciones e impagos del peaje**

Al igual que en otras ciudades la implementación del peaje urbano en la ciudad de Barcelona llevará implícita una política de descuentos y exenciones. En nuestro caso vamos a considerar que estarán exentos de la tasa de peaje los autobuses, motocicletas, ciclomotores y vehículos eléctricos. Los residentes de la ciudad inicialmente no se beneficiarían de ningún descuento. Ayudándonos de los datos de movilidad publicados por el Ayuntamiento de Barcelona en el año 2017 (ver Tabla B. 25) hemos estimado el impacto económico de esta medida que representaría aproximadamente un 32% de reducción de ingresos. Por otro lado, debido al entorno urbano del peaje, muy probablemente nos encontremos con un elevado porcentaje de impagos de la tarifa, por ello partiremos de la hipótesis de considerar un porcentaje de impagos del 25%. A continuación, se adjunta un cuadro resumen con la evaluación del impacto de estos efectos en la financiación del proyecto:

	Coste anual por exenciones de tasa (m€)	Coste anual por impago del peaje (m€)
P=9 cts/km	-78	-41
P=16 cts/km	-126	-67
P=30 cts/km	-207	-110

### 12.11.2 Análisis y resultados del estudio financiero

A partir de los ingresos y gastos considerados en el punto anterior mostramos, a continuación, un resumen de la cuenta de explotación para las distintas situaciones de peaje.

#### Cuenta de explotación para el escenario tarifario de 9 cts/km (m€)

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos (M€)			166	166	166	168	169	173	178	185
Gastos (M€)			81	81	81	82	83	84	87	90
RESULTADO BRUTO (M€)			85	85	85	86	86	88	91	95
Amortización			49	49	0	0	0	0	0	0
BENEFICIO ANTES DE IMPUESTOS (M€)			35	35	85	86	86	88	91	95
Impuesto de sociedades (35%) (M€)			12	12	30	30	30	31	32	33
BENEFICIO DESPUES DE IMPUESTOS (M€)			23	23	55	56	56	57	59	62
B.D.I. + AMORTIZACION (M€)			72	72	55	56	56	57	59	62
CASH FLOW PROYECTO (M€)	-59	-39	72	72	55	56	56	57	59	62

Tabla 80 Cuenta de explotación peaje urbano Barcelona tarifa 9 cts/km. Fuente: elaboración propia.

T.I.R. PROYECTO (P=9 CTS/KM) T=10 AÑOS	49%
VAN (T=10 AÑOS)	147 M€
TARIFA, VAN=0, T=10 AÑOS	0,060 €/KM

Tabla 81 Rentabilidad del proyecto a 10 años y tarifa que hace el VAN=0 para escenario tarifario 9 cts/km

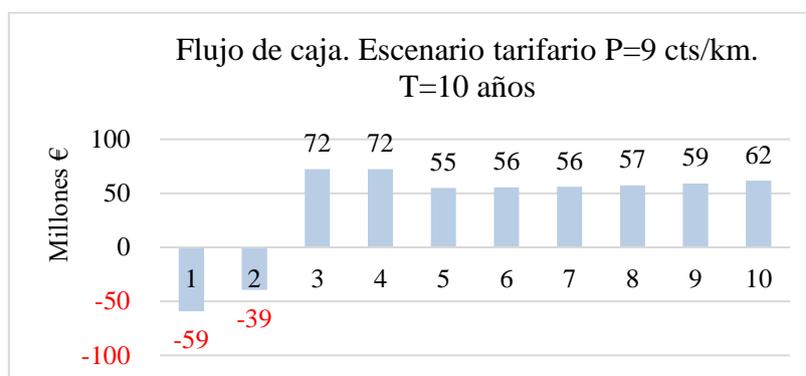


Figura 113 Flujo de caja del proyecto de peaje urbano de Barcelona tarifa 9 cts/km a 10 años. Fuente: elaboración propia.

**Cuenta de explotación para el escenario tarifario de 16 cts/km (m€)**

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos (M€)			268	268	268	270	273	279	287	298
Gastos (M€)			130	130	130	131	132	135	139	144
RESULTADO BRUTO (M€)			138	138	138	140	141	144	148	154
Amortización (M€)			48	48	0	0	0	0	0	0
BENEFICIO ANTES DE IMPUESTOS (M€)			90	90	138	140	141	144	148	154
Impuesto de sociedades (35%) (M€)			31	31	48	49	49	50	52	54
BENEFICIO DESPUES DE IMPUESTOS (M€)			58	58	90	91	92	93	96	100
B.D.I. + AMORTIZACION (M€)			107	107	90	91	92	93	96	100
CASH FLOW PROYECTO (M€)	-58	-39	107	107	90	91	92	93	96	100

Tabla 82. Cuenta de explotación peaje urbano Barcelona tarifa 16 cts/km. Fuente: elaboración propia.

T.I.R. PROYECTO (P=16 CTS/KM) T=10 AÑOS	72%
VAN (T=10 AÑOS)	340 M€
TARIFA, VAN=0, T=10 AÑOS	0,09 €/KM

Tabla 83. Rentabilidad del proyecto a 10 años y tarifa que hace el VAN=0 para escenario tarifario 16 cts/km.

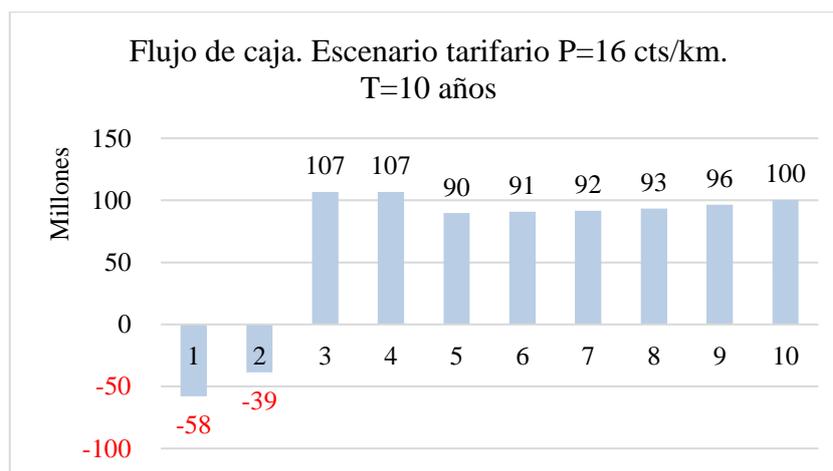


Figura 114. Flujo de caja del proyecto de peaje urbano de Barcelona tarifa 16 cts/km a 10 años. Fuente: elaboración propia.

**Cuenta de explotación para el escenario tarifario de 30 cts/km (m€)**

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos (M€)			439	439	439	444	448	457	471	490
Gastos (M€)			193	193	193	194	196	200	206	214
RESULTADO BRUTO (M€)			247	247	247	249	252	257	265	275
Amortización (M€)			48	48	0	0	0	0	0	0
BENEFICIO ANTES DE IMPUESTOS (M€)			198	198	247	249	252	257	265	275
Impuesto de sociedades (35%) (M€)			69	69	86	87	88	90	93	96
BENEFICIO DESPUES DE IMPUESTOS (M€)			129	129	160	162	164	167	172	179
B.D.I. + AMORTIZACION (M€)			177	177	160	162	164	167	172	179
CASH FLOW PROYECTO	-58	-39	177	177	160	162	164	167	172	179

Tabla 84 Cuenta de explotación peaje urbano Barcelona tarifa 30 cts/km. Fuente: elaboración propia.

T.I.R. PROYECTO (P=30 CTS/KM) T=10 AÑOS	109%
VAN (T=10 AÑOS)	726 M€
TARIFA, VAN=0, T=10 AÑOS	0,11 €/KM

Tabla 85 Rentabilidad del proyecto a 10 años y tarifa que hace el VAN=0 para escenario tarifario 30 cts/km

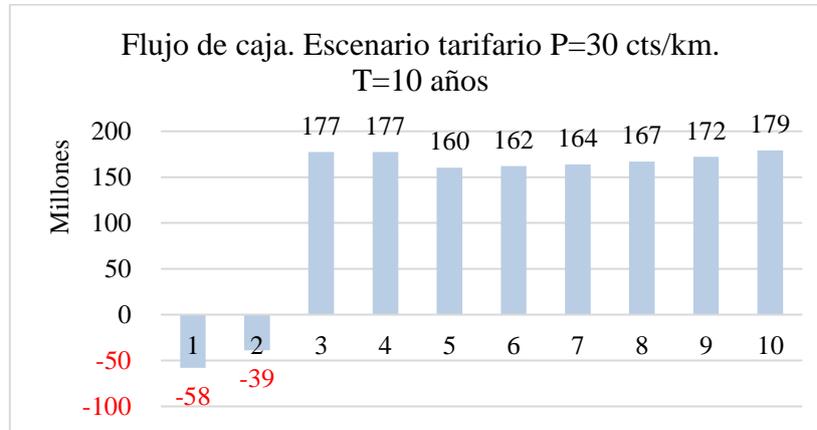


Figura 115. Flujo de caja del proyecto de peaje urbano de Barcelona tarifa 30 cts/km a 10 años. Fuente: elaboración propia.

### 12.11.3 Conclusiones del estudio financiero

En líneas generales, contemplando el proyecto a un plazo superior de 10 años, podemos decir que financieramente es viable con cualquier escenario. En términos financieros, la inversión se podría recuperar el segundo año de operación aplicando tanto la tarifa de 9 cts/km como la de 16 cts/km. La tarifa más alta de 30cts/km lograría recuperar la inversión ya el primer año. Como se ha dicho ya, para todos los escenarios no se ha considerado el efecto del coste marginal en los fondos públicos. Por otro lado, podemos concluir que, en líneas generales, los ahorros de tiempo conseguidos por los usuarios de la red básica de peaje equivalen aproximadamente a los ingresos generados por el sistema, con lo que se puede afirmar que el proyecto no beneficia a los conductores que utilizan la red básica, ya que pagan adecuadamente por su mejora de velocidad.

### 12.11.4 Análisis de riesgo del estudio financiero

A pesar, de que, a la vista de los resultados obtenidos, probablemente cualquier estrategia tarifaria aplicada a largo plazo podría ser rentable, existen riesgos que podrían hacer variar los resultados obtenidos. Algunos de los riesgos más significativos del proyecto, a nivel del estudio financiero, serían el cumplimiento de los porcentajes de impagos considerados, la previsión de tráfico supuesta y las exenciones aplicadas. A la vista de los resultados obtenidos, del análisis socioeconómico y financiero, podemos intuir que una tarifa de 16 cts/km podría ser una buena opción, puesto que se obtiene con ella una buena rentabilidad social y es viable financieramente hablando. Por ello, para el análisis del riesgo financiero del proyecto, nos centraremos en este escenario. Dado lo expuesto anteriormente, vamos a transformar los valores obtenidos de la demanda en la red básica, del porcentaje de impagos y de exenciones aplicadas en variables aleatorias a las cuales

asignaremos una función de densidad de probabilidad. A continuación, definimos los rangos de valores utilizados para las diferentes variables aleatorias:

- 1) Demanda de tráfico (en vehxkm): el modelo de tráfico nos ha proporcionado los resultados de la demanda de tráfico para la tarifa de 16 cts/km en la red básica. Para nuestro análisis de riesgo, y para estar del lado de la seguridad desde el punto de vista financiero, vamos a suponer que dicha demanda pueda llegar a reducirse en un 20%. Utilizaremos como valor más probable el del análisis de referencia.
- 2) Exenciones: se han considerado exentos del peaje urbanos los autobuses, motocicletas, ciclomotores y vehículos no contaminantes. Los residentes de la ciudad inicialmente no se beneficiarían de ningún descuento. En esta ocasión, para el análisis del riesgo, contemplaremos que, por posibles motivos de política municipal, estas exenciones puedan variar un 10% con respecto al escenario base. De esta forma utilizaremos como valor más probable el del análisis de referencia, es decir el 68% no exento, como valor mínimo el 78% no exento y como valor máximo el 58% no exento.
- 3) Impago del peaje: para el escenario base, como valor más probable, se ha supuesto una cuota de impagos del peaje del 25%. Dado que estamos en un entorno urbano donde probablemente el proyecto sea gestionado por las haciendas locales aumentaremos esta cuota hasta un 35%. De esta forma estableceremos un rango de impagos que se movería entre el 15%-35%. Para la aplicación práctica en la simulación hemos transformado estos porcentajes en m€.

A continuación, se adjunta una tabla resumen con los valores utilizados:

VARIABLES ALEATORIAS	Valor probable	Valor mínimo	Valor máximo
Demanda del tráfico (*10 <sup>6</sup> vehxkm)	8,8	7,8	9,8
Demanda no exenta del peaje (%)	68	78	58
Impago de peaje (%)	25	15	35
Impago de peaje (m€)	67	40	94

**Tabla 86. Rango de valores de las variables aleatorias definidas.**

Una vez hemos definido los rangos de valores más probables de las variables aleatorias, asignaremos a cada una su respectiva función de densidad de probabilidad. Al igual que para riesgo socioeconómico utilizaremos la función de densidad tipo Pert.

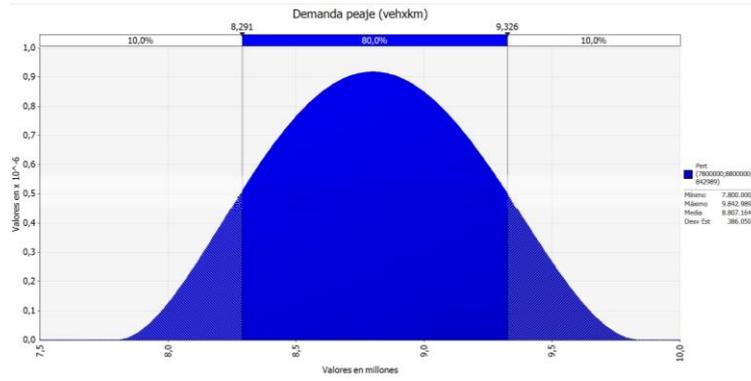


Figura 116. Función de distribución de probabilidad Pert utilizada para la demanda de tráfico en un escenario tarifario de 16 cts/km.

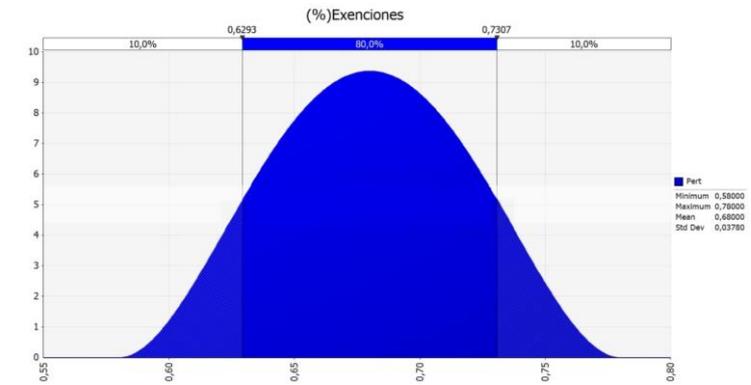


Figura 117. Función de distribución de probabilidad Pert utilizada para las exenciones en un escenario de tarifario 16 cts/km.

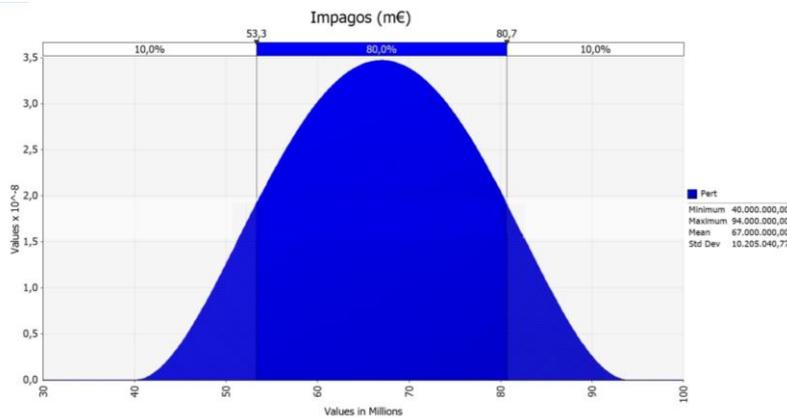
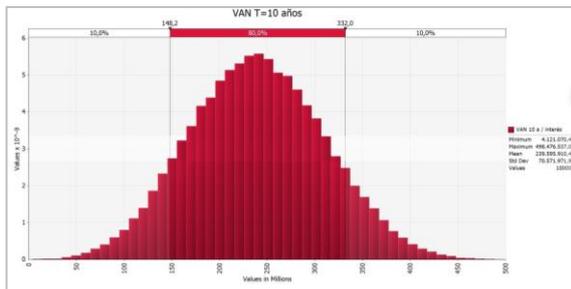


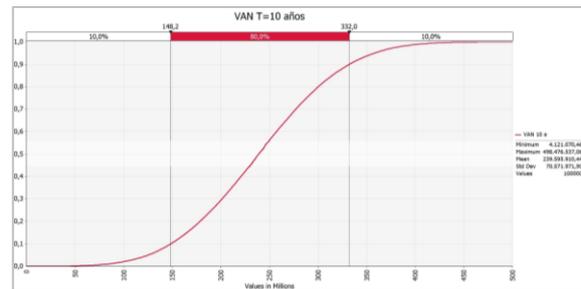
Figura 118. Función de distribución de probabilidad Pert utilizada para el porcentaje impagos en un escenario tarifario de 16 cts/km.

Al igual que para el estudio socioeconómico, para cada distribución de probabilidad se han realizado diferentes muestreos con los que recalcularemos el análisis financiero, cada vez con un grupo diferentes de valores posibles. En cada iteración calculamos los valores seleccionados como muestra y obtenemos un nuevo resultado posible. Se han hecho 100.000 iteraciones obteniendo los correspondientes histogramas de resultados, que se muestran a continuación:

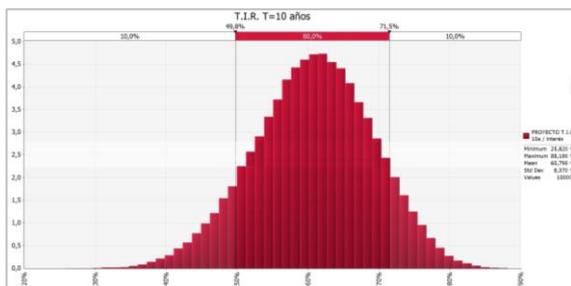
a) Histograma del VAN (m€)



b) Función de distribución acumulada VAN



c) Histograma del TIR (%)



d) Función de distribución acumulada TIR

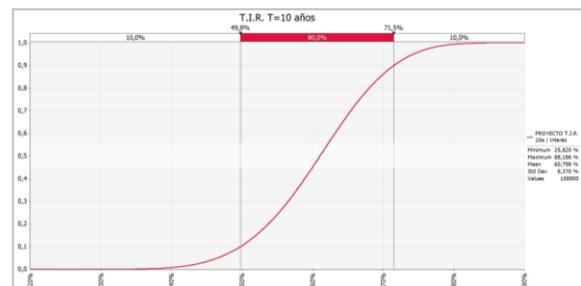


Figura 119. Histograma y función de distribución acumulada del VAN y TIR financiero a 10 años para una tarifa de peaje de 16 cts/km

### 12.11.5 Conclusiones del análisis de riesgo estudio financiero

Para las hipótesis de riesgo planteadas y después de simular las diferentes casuísticas que se nos pueden presentar, podemos decir que el riesgo de obtener resultados financieros negativos en el período de 10 años del ciclo del proyecto es prácticamente nulo a pesar de la elevada exigencia de rentabilidad (10%). Atendiendo al gráfico de la Figura 119 vemos cómo tendríamos un 80% de probabilidad de que el VAN del proyecto se situase entre los 148 m€ y los 332 m€ con una TIR comprendida entre el 50% y el 71%. Por lo tanto, el proyecto es una gran fuente de ingresos para la administración pública<sup>110</sup>, que debería dedicar estos fondos a la mejora del sistema de transporte colectivo, del espacio público (que debería tener una transformación substancial si se establecen las supermanzanas previstas en Barcelona) y, posiblemente, a compensar ciertas pérdidas de ingresos de fuentes relacionadas con la movilidad, como el aparcamiento en superficie.

<sup>110</sup> Aunque, para facilitar la discusión, se ha considerado el proyecto como una responsabilidad del Ayuntamiento de Barcelona, es evidente que el proyecto afecta claramente todo el ámbito metropolitano y también otras comarcas catalanas. La gobernanza del peaje urbano y, por tanto, de las distintas posibilidades de gestión y financiación del mismo, es un tema que merecería posiblemente otra tesis doctoral.

## **13. CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN**

### **13.1 Conclusiones**

Hemos podido comprobar que, en Europa, a pesar de los avances tecnológicos y la presión política para mejorar la calidad ambiental, los niveles de polución en muchas zonas urbanas siguen siendo superiores a los recomendados por la Unión Europea y la OMS. Esta polución, principalmente ocasionada por el tráfico rodado, genera una serie de efectos nocivos tanto para la salud de las personas como para el entorno físico. Según el informe de la Agencia Europea del Medio Ambiente las altas concentraciones de PM<sub>2,5</sub> fueron las responsables de unas 374.000 muertes prematuras en la Unión Europea durante el año 2016. Barcelona no es una excepción y ha sido amenazada por la Comisión Europea por sobrepasar los niveles límites de contaminantes atmosféricos. En este sentido las ciudades, que durante décadas se habían ido desarrollando para favorecer la movilidad en automóvil, en los últimos años han revertido estas políticas generadoras de capacidad para el tráfico a la vista de que llevan situaciones insostenibles debidas a la congestión, en términos de calidad de vida y de impactos ambientales y sociales. Así pues, se han ido popularizando medidas regulatorias sobre la utilización del espacio público (zonas peatonales o con severas restricciones a los vehículos, carriles bus, etc.) y sobre el aparcamiento y, en algunos casos, sobre el acceso de determinados vehículos a zonas sensibles. Los resultados han sido, en muchos casos, positivos pero insuficientes para conseguir que las áreas urbanas alcancen los objetivos de convivencia y de calidad ambiental deseados.

Parece necesario, por tanto, plantearse la implementación de nuevos instrumentos que permitan un mayor grado de efectividad en el desarrollo de la movilidad sostenible en las ciudades. El peaje urbano ha aparecido como uno de los que tiene mayor potencial. El caso más representativo y cercano a nuestro entorno es el peaje urbano de Londres, que ha sido analizado junto a otros casos interesantes como los de Singapur o Estocolmo. Todos estos sistemas muestran resultados altamente positivos logrando reducciones del tráfico viario sustanciales y, en consecuencia, una reducción de la congestión y emisión de gases contaminantes. A pesar de que su implantación tuvo, inicialmente, un cierto grado de rechazo social, su aceptación a medio y largo plazo ha sido buena, fruto de la mejora ambiental y de movilidad percibida por los ciudadanos.

De la experiencia internacional hemos podido comprobar que, en general, los peajes urbanos en marcha imponen tarifas que no dependen del uso de la infraestructura, ni de la contaminación realmente generada por el vehículo, además no existen alternativas gratuitas una vez se accede al área tarifada. En esta tesis hemos propuesto un nuevo modelo de peaje urbano que no sólo incide en el tipo de esquema tarifario, sino que además actúa sobre la jerarquía viaria urbana, reestructurándola y ligándola a un servicio, de ahí la novedad de la propuesta. Los últimos avances tecnológicos hacen posible la implementación de este nuevo modelo y hemos visto como combinando la tecnología de navegación satelital con las comunicaciones

móviles (GSM) podemos desarrollar un sistema de peaje en línea con los principios tarifarios de la Unión Europea “el que usa y contamina paga”. La ciudad de Singapur ya trabaja en esta dirección y estudia una evolución tecnológica de su actual sistema de peaje urbano. Además, en particular, el despliegue futuro de la red de comunicaciones 5G, podría llegar a permitir la total conexión del vehículo con su entorno lo que hace necesario que estos sistemas deban ser lo suficientemente escalables para su adaptación futura. En cualquier caso, el rápido desarrollo de las telecomunicaciones hace que sea, en el momento de su implementación, cuando se deba concretar la tecnología más idónea para el nuevo sistema propuesto.

Pese a la utilización creciente de los peajes urbanos como medida para disminuir el tráfico rodado en ciudades, actualmente no hay una base extensa de estudios que analice el posible impacto de esta medida dentro del entorno de Barcelona. Sin embargo, desde el 1 de enero de 2020, la ciudad tiene en marcha una zona de bajas emisiones donde sólo pueden ingresar vehículos con distintivo ambiental, no obstante, la medida todavía tiene que demostrar su valía. En esta tesis, a partir de la información disponible, hemos evaluado los efectos que tendría la implantación de un nuevo modelo de peaje urbano en Barcelona, capaz de segregar la red viaria urbana en dos, una red vial de pago y otra gratuita, tarifando a sus usuarios en función de la distancia real recorrida, aunque la tecnología planteada permitiría ligar la tarifa a otros parámetros de viaje como la contaminación, el horario, etc.

El impacto sobre la movilidad del vehículo privado, que supondría la aplicación del nuevo modelo de peaje urbano en Barcelona, se ha evaluado a partir de una adaptación del modelo de tráfico tradicional de 4 pasos. Los resultados obtenidos indican que la medida podría llegar a reducir un 21% la demanda de tráfico (en veh-km) implantando una tarifa de peaje 16 cts/km. Según los estudios de BCN Ecología, esta reducción de la demanda de tráfico en Barcelona cumpliría con los estándares mínimos de calidad del aire fijados por la Unión Europea. Al mismo tiempo, observando la experiencia londinense, la implantación del peaje urbano podría aumentar la velocidad comercial del autobús urbano cuyos usuarios, sin necesidad de pagar la tasa, se beneficiarían de menores tiempos viaje, así como de un mejor entorno. Para garantizar que los viajes expulsados de la red de peaje se transfieren a medios de transporte más sostenibles la propuesta llevaría implícita una serie de actuaciones dirigidas a reducir la capacidad vial en la red secundaria y a recuperar espacio público en la ciudad (aceras, carriles bici, etc.). La implantación de las supermanzanas sería una fórmula evidente de actuación en este sentido.

El modelo de transporte empleado presenta ciertas limitaciones, la principal es que se basa en la matriz OD de viajes en automóvil y no lleva implícito el cambio modal de los viajes hacia otros medios de transporte, lo que nos ha hecho aplicar un modelo de reparto modal desacoplado de la asignación. Por otro lado, el área de análisis se ha limitado a un ámbito próximo a la ciudad de Barcelona. En futuras líneas de investigación sería interesante ver el impacto de la medida en el conjunto del área metropolitana de Barcelona.

A nivel socioeconómico, a la vista de los resultados obtenidos, podemos concluir que, de implementarse la medida en Barcelona con una tarifa de 16 cts/km, los recursos invertidos se recuperarían ya el primer año

de operación, por lo que la medida es muy rentable socioeconómicamente hablando. Para un ciclo del proyecto de 10 años, a partir de los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad, el peaje urbano en Barcelona podría generar, con una probabilidad del 80%, un VAN comprendido entre los 630-819 m€ con una TIR muy elevada, oscilando entre los 107-131%<sup>100</sup>, respectivamente. Estos valores se deben, en gran medida, a los beneficios ambientales generados por la reducción del tráfico.

En cuanto a la rentabilidad financiera del proyecto se concluye que, según las hipótesis planteadas en el análisis de sensibilidad, el riesgo de obtener resultados económicos negativos en un ciclo de proyecto de 10 años es prácticamente nulo, a pesar de haberle exigido a la inversión una elevada rentabilidad (10%). La inversión generaría, con una probabilidad del 80%, un VAN comprendido entre los 148 m€ y los 332 m€, con una TIR situada entre el 50% y el 71%.

En resumen, la implementación del nuevo modelo de peaje urbano en Barcelona podría hacer que la ciudad de Barcelona cumpliera con los límites de contaminación atmosférica exigidos por la UE, mejorando la calidad del aire de su entorno y por consiguiente la salud de sus ciudadanos. Además, el sistema de peaje urbano generaría ingresos adicionales a la administración pública que podrían revertir en mejorar el sistema de transporte público de la ciudad y de esta forma aliviar los posibles efectos regresivos derivados de la medida.

## **13.2 Líneas de investigación**

Por último, cerramos el documento indicando futuras líneas de trabajo y de investigación derivadas de la tesis:

1. Aplicar el nuevo modelo de peaje urbano con un modelo de transporte que englobe el conjunto de la movilidad y lleve acoplado adecuadamente el reparto modal, considerando todos los modos de transporte alternativos al vehículo privado (autobús, metro, ferrocarril, vehículo eléctrico, vehículo compartido, bicicleta, patinete eléctrico e incluso caminar).
2. Analizar el impacto de la implantación del nuevo modelo de peaje urbano en el conjunto del área metropolitana de Barcelona y realizar un nuevo estudio actualizado del valor del tiempo de los viajes en el entorno metropolitano.
3. Analizar el impacto de la medida sobre ciertos sectores económicos de la ciudad como el comercial y el inmobiliario, además de ver su efecto sobre los aparcamientos en superficie en el caso de que sean eliminados de la red básica.
4. Formular una tarifa de peaje urbana vinculada al nivel de contaminación emitido por cada vehículo y variable según el momento de realización del viaje y analizar su impacto potencial adicional.
5. Desarrollar una prueba piloto de peaje urbano en la ciudad de Barcelona.

6. Establecer una nueva regulación semafórica en la ciudad que permita una mejor operación de la red básica de peaje.
7. Adaptar la red de transporte público de autobuses al nuevo peaje urbano.
8. Estudiar el impacto presupuestario y fiscal del nuevo modelo. Efectos sobre la recaudación por aparcamiento, IBI, etc., posibles compensaciones a los residentes de zonas más afectadas por la medida, impacto en los impuestos municipales, autonómicos o estatales ligados a los combustibles, etc.
9. Analizar el posible efecto de la medida sobre la electrificación del parque y sobre los proveedores de servicios de movilidad (taxi, VTC, car-sharing, etc.).
10. Investigar las nuevas arquitecturas tecnológicas que permitan integrar todos los subsistemas de movilidad en una plataforma común capaz de operar en tiempo real, integrando modelos predictivos de tráfico que permitan hacer una mejor gestión de la movilidad en la ciudad.
11. Diseñar el sistema de almacenamiento tratamiento y de datos generados por el nuevo sistema de peaje urbano que sea capaz de procesar más de dos millones de desplazamientos diarios.

## 14. BIBLIOGRAFÍA

- Abou-Senna, H. (2016). Congestion pricing strategies to investigate the potential of route diversion on toll facilities using en-route guidance. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 3(1), 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2016.01.003>
- Afandizadeh, S., Yadak, M., & Kalantari, N. (2011). Simultaneous determination of optimal toll locations and toll levels in cordon-based congestion pricing problem (case study of Mashhad city). *International Journal of Civil Engineering*, 9(1), 33–40.
- Agència de la Salut Pública de Barcelona (2018). Informe de qualitat de l'aire de Barcelona, 2018.
- Ajuntament de Barcelona. (2013). Pla de Mobilitat Urbana de Barcelona 2013-2018. *Ajuntament de Barcelona*, 56. Retrieved from [http://w110.bcn.cat/portal/site/Mobilitat/menuitem.9a8066d1d6190a2591f791f7a2ef8a0c/?vgnextoid=560ace3a4c77b210VgnVCM10000074fea8c0RCRD&vgnnextchannel=560ace3a4c77b210VgnVCM10000074fea8c0RCRD&lang=ES\\_ES](http://w110.bcn.cat/portal/site/Mobilitat/menuitem.9a8066d1d6190a2591f791f7a2ef8a0c/?vgnextoid=560ace3a4c77b210VgnVCM10000074fea8c0RCRD&vgnnextchannel=560ace3a4c77b210VgnVCM10000074fea8c0RCRD&lang=ES_ES)
- Ajuntament de Barcelona. (2017). Anàlisi i previsió de la reducció del nombre de viatges motoritzats per restricció de la capacitat viària Valoració socio econòmica de l'espai públic alliberat de trànsit.
- Albalate, D., & Bel, G. (2009). What local policy makers should know about Urban road charging: Lessons from worldwide experience. *Public Administration Review*, 69(5), 962–975. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6210.2009.02045.x>
- Albert, G.; Mahalel, D. (2006). Congestion tolls and parking fees: a comparison of the potential effect on travel behaviour. *Transport Policy*, 13, 496–502.
- Alegre, P. S., & Magro, J. M. V. (2012). Implantación de nuevos sistemas electrónicos de cobro de peaje en España. *Revista de Obras Públicas*.
- Al-Manthari, B., Nasser, N., & Hassanein, H. (2011). Congestion Pricing in Wireless Cellular Networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 13(3), 358–371. <https://doi.org/10.1109/SURV.2011.090710.00042>
- Al-Rasyid, H., Lubis, S., Researcher, S., Armijaya, H., & Karsaman, R. H. (2001). Urban Toll Road Users Value of Time Saving. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studie S*, 4(6).
- Álvarez, Ó. (2007). The value of time and transport policies in a parallel road network. *Transport Policy*, 14 (5), 366-376.
- Aman, A. J., Nuñez, D. C., Hamideddin, M., Laungani, P., Abbo, W., & Donohue, G. (2009). Evaluation of congestion pricing for management highway in Seattle. *2009 IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium, SIEDS '09*, 258–263. <https://doi.org/10.1109/SIEDS.2009.5166191>
- Amdal, E.; Bårdsen, G.; Johansen, K.; Welde, M. (2007). Operating costs in Norwegian toll companies: a panel data analysis. *Transportation*, 34, 681–695.
- Anas, A. & Lindsey, R. (2011). Reducing urban road transportation externalities: Road pricing in theory and in practice. *Review of Environmental Economics and Policy*, 5 (1), 66–88.

- Arentze, T., & Timmermans, H. (2007). Congestion pricing scenarios and change of job or residential location: Results of a stated adaptation experiment. *Journal of Transport Geography*, 15(1), 56–61. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2006.02.013>
- Arnott, Richard; de Palma, André; Lindsey, R. (1993). A Structural Model of Peak-Period Congestion: A Traffic Bottleneck with Elastic Demand. *The American Economic Review*, 83, 1961–179.
- Atkinson, A.B., Stern, N. (1974). Pigou, taxation and public goods. *Review of Economic Studies*, 41, 119–128.
- Attard, M., & Enoch, M. (2011). Policy transfer and the introduction of road pricing in Valletta, Malta. *Transport Policy*, 18(3), 544–553. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.10.004>
- Azari. (2013). Modelling demand under parking and cordon pricing policy. *Transp. Policy*, 25, 1–9.
- Azari, K. A., Arintono, S., Hamid, H., & Davoodi, S. R. (2013). Evaluation of demand for different trip purposes under various congestion pricing scenarios. *Journal of Transport Geography*, 29, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.01.001>
- Baar, T.; Olsder, G. J. (1982). Dynamic Noncooperative Game Theory. *Academic Press, New York*.
- Bain, R. (2009). Error and Optimism Bias in Toll Road Traffic Forecasts. *Transportation*, 36 (5).
- Balac, M., Ciari, F., & Axhausen, K. W. (2017). Modeling the impact of parking price policy on free-floating carsharing: Case study for Zurich, Switzerland. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 77, 207–225. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.01.022>
- Bartin. (2007). Impact of electronic toll collection on air pollution levels: Estimation using microscopic simulation model of large-scale transportation network. *Transportation Research*, (2011), 68–77.
- Basso. (2012). Integrating congestion pricing, transit Subsidies and mode choice. *Transportation Research Part A*, 46, 890–900.
- Basso, L.J., and Jara Díaz, S. (2012). Integrating congestion pricing, transit Subsidies and mode choice. *Transportation Research Part A*, 46, 890–900.
- Basso, L; Jara-Díaz, S. R. (2012). Integrating congestion pricing mode choice. *Transportation Research*, 46 (6), 890–900.
- Beckmann, M.J.; McGuire, C.B.; Winsten, C. B. (1956). Studies in the Economics of Transportation. *Yale University Press, New Haven, Conn*.
- Beevers, S. D., & Carslaw, D. C. (2005). The impact of congestion charging on vehicle emissions in London. *Atmospheric Environment*, 39(1), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.10.001>
- Bel, G. (1995). La congestión y sus costes: una modelización aplicable al tráfico viario interurbano G e m a Bel. *Cuadernos de Economía*. Vol. 23 173-195, 23.
- Beser, M., Algers, S., 2002. SAMPERS. (2002). The New Swedish National Travel Demand Forecasting Tool. *National Transport Models: Recent Developments and Prospects*.
- Bhatt, K. (1993). Implementing congestion pricing: winners and losers. *ITE Journal*, 63 (12), 33–37.

- Björklind, K., Danielsson, J., Lindholm, P., Björk, H., Coulianos, M., & Tjernkvist, M. (2014). Första året med Västsvenska paketet (The first year with the West-Swedish package).
- Blythe, P. T., & Hills, P. J. (1993). The ADEPT Project, 637–642.
- Bonsall, P., Shires, J., Maule, J., Matthews, B., & Beale, J. (2007). Responses to complex pricing signals: Theory, evidence and implications for road pricing. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41(7), 672–683. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2006.06.001>
- Bonsall, P., & Young, W. (2010). Is there a case for replacing parking charges by road user charges? *Transport Policy*, 17(5), 323–334. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.02.006>
- Börjesson, M. (2018). The Gothenburg congestion charges: cost – benefit analysis and distribution effects. <https://doi.org/10.1007/s11116-017-9853-4>
- Börjesson, M. (2017). The Swedish Congestion Charges: Ten Years On. *Center for Transport Studies-Stockholm*, 2017:2, 1–29.
- Börjesson, M., & Eliasson, J. (2014). Experiences from the Swedish Value of Time study. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 59, 144–158. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.10.022>
- 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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.11.001>
- Börjesson, M., Eliasson, J., Hugosson, M. B., & Brundell-Freij, K. (2012). °. *Transport Policy*, 20, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.11.001>
- Börjesson, M., & Kristoffersson, I. (2015). The Gothenburg congestion charge. Effects, design and politics, 75, 134–146. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.03.011>
- Brown, M. (1994). Using Gini-style indices to evaluate the spatial patterns of health practitioners; theoretical considerations and an application based on the Alberta data. *Social Science and Medicine*, 38(9), 1243-1256.
- Browning, E. K. (1976). The marginal cost of public funds. *Journal of Political Economy*, 84, 283–298.
- Bull, A. (2013). *Congestión de Tránsito el problema y como enfrentarlo. Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Bureau, B., and Glachant, M. (2008). Distributional effects of road pricing: Assessment of nine scenarios for Paris. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42, 994–1007.
- Caragliu, A., Bo, C. Del, & Nijkamp, P. (2015). Smart Cities in Europe Smart Cities in Europe, 0732(November), 45–59. <https://doi.org/10.1080/10630732.2011.601117>
- Carnovale, M., Gibson, M. (2013). The Effects of Driving Restrictions on Air Quality and Driver Behavior. *EScholarship*.

- Carrasco Diaz, E. et al. (2012). La Tarificación Vial En El Marco De La Unión Europea. Situación Actual En España, 1–12.
- CE Delft, ECORYS, & Stratec. (2004). Marginal costs of infrastructure use - towards a simplified approach. *CE Delft*, 1–164.
- Chen, X., Zhang, L., He, X., Xiong, C., & Li, Z. (2014). Surrogate-Based Optimization of Expensive-to-Evaluate Objective for Optimal Highway Toll Charges in Transportation Network. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 29(5), 359–381. <https://doi.org/10.1111/mice.12058>
- Cherchi, E., and Polak, J. W. (2007). The Implication of Disregarding Income Effects in the Assessment of User Benefit Using Discrete Choice Models. *Transportation Research Board Annual Meeting 86<sup>th</sup>, Washington DC*.
- City of Gothenburg. (2013). Förändrade resvanor Trängselskattens effekter på.
- City of Gothenburg, 2013b. (2013). Travel Times in Gothenburg – A Comparison between 2012 and 2013.
- Codina et al. (2013). Programación matemática binivel en planificación del transporte urbano: Estado del Arte y nuevos modelos.
- Comisión Europea. (1998). Tarifas justas por el uso de infraestructuras Estrategia gradual para un marco común.
- Comisión Europea. (2001). La política europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad.
- Correa Restrepo, Francisco; Osorio Múnera, J. D. (2011). Valoración económica del ruido: una revisión analítica de estudios \*, 53–76.
- Cowley, R., Joss, S., & Dayot, Y. (2017). The smart city and its publics: insights from across six UK cities. *Urban Research & Practice*, 00(00), 1–25. <https://doi.org/10.1080/17535069.2017.1293150>
- Crespo, G. (2018). Infraestructures i gestió de la mobilitat: aspectes econòmics, territorials i rendibilitat social. *Universitat Politècnica de Catalunya*.
- Daganzo, C. F. (1997). *Fundamentals of transportation and traffic operations*. (Elsiver, Ed.).
- Daganzo, C. F., & Sheffi, Y. (1977). On Stochastic Models of Traffic Assignment. *Transportation Science*, 11(3), 253–274. <https://doi.org/10.1287/trsc.11.3.253>
- Danielis, R., Rotaris, L., Marcucci, E., & Massiani, J. (2012). A medium-term evaluation of the Ecopass road pricing scheme in Milan: economic, environmental and transport impacts. *Economics and Policy of Energy and the Environment*, 2, 49–83.
- Daskin, M. S., Schofer, J. L., & Haghani, A. E. (1988). A quadratic programming model for designing and evaluating distance-based and zone fares for urban transit. *Transportation Research Part B*, 22(1). [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(88\)90032-X](https://doi.org/10.1016/0191-2615(88)90032-X)
- Daunfeldt, S. O., Rudholm, N., & Rämme, U. (2009). Congestion charges and retail revenues: Results from the Stockholm road pricing trial. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43(3), 306–309. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.09.005>

- Davis, C., and Jha, M. K. (2009). Modeling the effects of socioeconomic factors in highway construction and expansion. *Journal of Transportation Engineering*, 135(12), 990-998.
- De Borger, B. & Proost, S. (2001). Reforming Transport Pricing in the European Union – A Modelling Approach. *Cheltenham*.
- De Corla-Souza, P. (2009). A Concept of Operations for Peak Period Pricing on Metropolitan Freeway Systems. *Transportation Research Board Annual Meeting 88<sup>th</sup>*, Washington DC.
- De Grange, L., & Troncoso, R. (2015). Límites de la tarificación vial. *Eure*, 41(122), 167–184. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612015000100008>
- De Palma, A., & Lindsey, R. (2011). Traffic congestion pricing methodologies and technologies. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(6), 1377–1399. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.02.010>
- Delbosc, A., and Currie, G. (2011). Transport problems that matter—social and psychological links to transport disadvantage. *Journal of Transport Geography*, 19 (1), 170–178.
- Diao, M. (2018). Towards sustainable urban transport in Singapore: Policy instruments and mobility trends. *Transport Policy*, (November 2016), 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.05.005>
- Dias, J., Matos, J. N., & Oliveira, A. S. R. (2014). The Charge Collector System. *Procedia Technology*, 17, 130–137. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.10.220>
- Done, R.S. and Tong, D. (2009). Distance Value Model: Geospatial Implementation of Environmental Justice. *Transportation Research Board Annual Meeting 88<sup>th</sup>*, Washington DC.
- Eliasson, J., and Mattson, L. (2006). Equity effects of congestion pricing. Quantitative methodology and a case study for Stockholm. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40, 602 – 620.
- Eliasson, J. (2009). A cost-benefit analysis of the Stockholm congestion charging system. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43(4), 468–480. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.11.014>
- Eliasson, J. (2016). Is congestion pricing fair? Consumer and citizen perspectives on equity effects. *Transport Policy*, 52, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.06.009>
- Eliasson, J. (n.d.). Pigouvian taxation under uncertain demand: Are demand-responsive congestion pricing worth it? Short abstract Main results Numerical simulation. *KTH Royal Institute of Technology*.
- Eliasson, J. (2016). Is congestion pricing fair? Consumer and citizen perspectives on equity effects. *Transport Policy*, 52, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.06.009>
- Eliasson, J. (2009). Lessons from the Stockholm congestion charging trial, 15(2008), 395–404. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2008.12.004>
- Eliasson, J. et al. (2006). The Stockholm Congestion Charging Trial What happened? *Expert Group*.
- Eliasson, J., & Fosgerau, M. (2017). Cost-benefit analysis of transport improvements in the presence of spillovers, matching and an income tax, 1–20.

- Eliasson, J., Hultkrantz, L., Nerhagen, L., & Rosqvist, L. S. (2009). The Stockholm congestion - charging trial 2006: Overview of effects. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43(3), 240–250. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.09.007>
- Estrada, M., Roca-Riu, M., Badia, H., Robusté, F., & Daganzo, C. F. (2011). Design and implementation of efficient transit networks: Procedure, case study and validity test. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 45(9), 935–950. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.04.006>
- Estrada, M., Robusté, F., Amat, C., Badia, H., & Barceló, J. (2011). On the optimal length of the transit network in Barcelona, 1–13.
- European Environment Agency. (2017). *Air quality in Europe — 2017 report No 13/2017. EEA Technical Report*. <https://doi.org/10.2800/850018>
- European Innovation Partnership. (2013). European Innovation Partnership on Smart Cities and Communities Strategic Implementation Plan. *European Innovation Partnership on Smart Cities 2013*, (Strategic Implementation Plan).
- Evans, J. (2007). Central London congestion charging distance-based charging trial. In *14<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Transport Systems*.
- Fabio, B., & Autostrade, P. (n.d.). Relationships with the Motorway Toll Collection Schemes: the cases of Florence and Rome in the experience of Autostrade SpA.
- Fan, W. D. (2016). Optimal congestion pricing toll design under multiclass transportation network schemes: Genetic algorithm approaches. *Case Studies on Transport Policy*, 4(2), 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2016.02.005>
- Farideh Ramjerdi. (2004). NORWEGIAN URBAN TOLLS. *Research in Transportation Economics*, 9 (1), 237–249.
- Feng, T., Zhang, J., and Fujiwara, A. (2009). Comparison of Transportation Network Optimization with Different Equity Measures Using Bilevel Programming Approach. *Transportation Research Board Annual Meeting 88<sup>th</sup>, Washington DC*.
- Ferrari, P. (2005). Road pricing and user's surplus. *Transport Policy*, 12, 477 – 487.
- Fjellinjen. (2004). Årsrapport [Annual Report].
- Flores-fillol, R. (2018). Atascos y contaminación en grandes ciudades: Análisis y soluciones. Fedea.
- Franklin, J., Eliasson, J., Karlström, A. (2008). Traveller responses to the Stockholm congestion pricing trial: who changed, where did they go, and what did it cost them? *Demand Management and Road User Pricing: Success, Failure and Feasibility*.
- Franklin, J. P. (2007). Decomposing the Distributional Effects of Roadway Tolls. *Transportation Research Board Annual Meeting 86<sup>th</sup>, Washington DC*.
- García Ródenas, R. (2001). Metodología para el Diseño de Redes de Transporte y para la elaboración de algoritmos en Programación Matemática Convexa y Diferenciable. *Tesis*.
- Generalitat de Catalunya. Departament de territori i sostenibilitat. (2016). Finançament i costos de la xarxa de carreteres de Catalunya.

- Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat. (2013). Guia de càlcul d'emissions de contaminants a l'atmosfera.
- Gibson, M., & Carnovale, M. (2015). (2015). The effects of road pricing on driver behavior and air pollution. *Journal of Urban Economics*, 89, 62–63.
- Gibson, M., Carnovale, M., Gibson, M., Carnovale, M., & Gibson, M. (2017). The effects of road pricing on driver behavior and air pollution to cite this version: HAL Id: hal-01589743 The effects of road pricing on driver behaviour and air pollution.
- Giuliano, G. (1992). An assessment of the political acceptability of congestion pricing. *Transportation*, 19(4), 335–358.
- Goh, M. (2002). Congestion management and electronic road pricing in Singapore. *Journal of Transport Geography*, 10(1), 29–38. [https://doi.org/10.1016/S0966-6923\(01\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0966-6923(01)00036-9)
- Goletz, M., Heinrichs, P. D., & Feige, I. (2016). Mobility trends in cutting-edge cities.
- González, J. E. R. (2005). Sistema de Peaje Free-Flow para Autopista Central de Santiago de Chile. *Revista de Obras Publicas*.
- Goodwin, P. (1997). Solving congestion: Inaugural lecture of the professorship of transport policy. *University College London*.
- Goodwin, P. (2004). Congestion charging in central London: Lessons learned. *Planning Theory & Practice*, 5(4), 501–505. <https://doi.org/10.1080/1464935042000293242>
- Grue, B.; Larsen, O.I.; Rekdal, J.; Tretvik, T. (1997). Køkostnader og køprising i bytrafikk. *Transportøkonomisk Institutt, Oslo*.
- Guzmán-García, L. A., Centro, I., Investigación, D., & Transyt, T. (2009). Bienestar Derivados De La Implementación De Un Cobro Por Congestión, 1–10.
- Habla, W. (2016). Electric vs conventional vehicles: Environmental Externalities and Urban Spatial Policies, 1–4.
- Han, D.; Yang, H. (2008). The multi-class, multi-criterion traffic equilibrium and the efficiency of congestion pricing. *Transportation Research, Part E* 44(, 753–773.
- Hårsman, B. (2003). Success and Failure: Experiences from Cities. <https://doi.org/10.1108/9781786359506-009>
- Hau, T. D. (1998). Congestion pricing and road investment. *J. K. Button & E. Verhoef (Eds.)*.
- Hau, T. D. (1992). Economic fundamentals of road pricing. A diagrammatic analysis. *World Bank Working*, 1070.
- Hau, T. D. (2005). Economic fundamentals of road pricing: A Diagrammatic Analysis, Part I. Fundamentals. *Transportmetrica*, 1 (2), 81–117.
- Heard, D.W.; Ramana, M. (1998). Solving congestion toll pricing models. *Kluber Academic Publisher*, 109–112.

- Higgins, T. (2009). The Acceptability of Road Pricing: Notable Findings- and Gaps for Research. *TR News*, 263, 34–35.
- Hormigo Ventura, J. P. (2006). La evolución de los factores de localización de actividades. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Hu, S.; Saleh, W. (2005). Impacts of congestion charging on shopping trips in Edinburgh. *Transp. Policy*, 12(5), 443–450.
- Ieromonachou, P., Potter, S., & Warren, J. P. (2006). Norway's urban toll rings: Evolving towards congestion charging? *Transport Policy*, 13(5), 367–378. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2006.01.003>
- Ieromonachou, P., Potter, S., & Enoch, M. (2004). Adapting Strategic Niche Management for evaluating radical transport policies-The case of the Durham Road access Charging Scheme. *International Journal of Transport Management*, 2(2), 75–87. <https://doi.org/10.1016/j.ijtm.2004.09.002>
- International Transport Forum. (2019). Smart Use of Roads.
- Iribarren, S. G., Iribarren, S. G., Iribarren, S. G., Grunig, S., & Ivan, I. (2013). Ivan Illich (1926-2002): the convivial city.
- Ison, S., & Rye, T. (2005). Implementing Road User Charging: The Lessons Learnt from Hong Kong. *Transport Reviews*, 25 (4), 451–465.
- Izquierdo, R., and Vassallo, J. M. (2001). Objetivos económicos de la introducción de peajes en carreteras interurbanas. *Revista de Obras Públicas*, 3, 7–31.
- Jensen-Butler, C. (2008). Road pricing, the economy and the environment.
- Johansson, Börje; Lars-Göran, M. (1991). Road Pricing: Theory, Empirical Assessment and Policy. Royal Institute of Technology Stockholm.
- Jones, P. (1991). Gaining public support for road pricing through a package approach. *Traffic Engineering & Control*, 32(4), 194–196.
- Keeler, T.E; Small, K. A. (1977). Optimal peak-load pricing, investment and service level on urban expressways. *Journal of Political Economy*, 85, 1–25.
- Kickh, B., & Kr, L. (2017). Autonomous car- and ride-sharing systems: A simulation-based evaluation of various supply options for different regions, 1–4.
- King, D. (2007). The political calculus of congestion pricing. *Transport Policy*, 14, 111–123.
- Kopp, P., & Prud'homme, R. (2008). Urban Tolls: Price and Congestion Some Lessons for a Better Urban Public, 1–31.
- Kottenhoff, K., & Brundell Freij, K. (2009). The role of public transport for feasibility and acceptability of congestion charging - The case of Stockholm. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43(3), 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.09.004>
- Kristoffersson, I., 2013. (2013). Impacts of time-varying cordon pricing: validation and application of mesoscopic model for Stockholm. *Transp. Policy*, 28, 51–60.

- Langmyhr, T. (1997). Managing equity. The case of road pricing. *Transport Policy*, 4, 25 – 39.
- Laña, I., Del Ser, J., Padró, A., Vélez, M., & Casanova-Mateo, C. (2016). The role of local urban traffic and meteorological conditions in air pollution: A data-based case study in Madrid, Spain. *Atmospheric Environment*, 145, 424–438. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.052>
- Larsen, O.I. (1995). The toll cordons in Norway: an overview. *Journal of Transport Geography*, 3, 187–197.
- Lauridsen, H. (2011). The impacts of road tolling: A review of Norwegian experience. *Transport Policy*, 18, 85–91.
- Lave, C. (1994). The demand curve under road pricing and the problem of political feasibility: A comment. *Transportation Research Part A*, 29(6), 459–465. [https://doi.org/10.1016/0965-8564\(95\)00005-9](https://doi.org/10.1016/0965-8564(95)00005-9)
- Lawphongpanich, S., & Yin, Y. (2012). Nonlinear pricing on transportation networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 20(1), 218–235. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.05.010>
- Le Blanc, J. L. (1973). Mathematical programming algorithm for large scale network equilibrium and network design problems. *Northwestern University*.
- Le Blanc, J. L. (1975). An algorithm for the discrete network design problem. *Transportation Science*, 9, 183–199.
- Leape, J. (2006). The London Congestion Charge. *The Journal of Economic Perspectives*, 20, 157–176.
- Leck, E., Bekhor, S., and Gat, D. (2008). Equity impacts of transportation improvements on core and peripheral cities. *Journal of Transport and Land Use*, 1.
- Levinson, D. (2010). Equity effects of road pricing: A review. *Transport Reviews*, 30(1), 33–57. <https://doi.org/10.1080/01441640903189304>
- Levison, D. (2002). Identifying winners and losers in transportation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1812(1), 179-185.
- Lian, J. I. (2008). The Oslo and Bergen toll rings and road building investment – Effect on traffic development and congestion. *Journal of Transport Geography*, 16(174–181).
- Litman, T. (2006). London congestion pricing. Implications for Other Cities. *Victoria Transport Policy Institute*.
- Litman, T. (2011). Using road pricing revenue: economic efficiency and equity considerations. *Victoria Transport Policy Institute*.
- Litman, T. (2005). Evaluating transportation equity: Guidance for incorporation distributional impacts in Transportation Planning. *Victoria Transport Policy Institute*.
- Litman, T. (2013). The New Transportation Planning Paradigm. *VTPI Documents for the ITE Journal*.
- Liu, Z., Wang, S., & Meng, Q. (2014). Optimal joint distance and time toll for cordon-based congestion pricing. *Transportation Research Part B: Methodological*, 69, 81–97. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.08.005>

- Liveable Cities (Singapore), C. for. (2014). *Urban systems studies - Financing a city: Singapore*.
- Lo, B. H. K., & Hickman, M. D. (1997). Toward an evaluation framework for road pricing (Reviewed by the Urban Transportation Division), 2(August), 316–324.
- López, E., & Vassallo, J. M. (2010). Efectos de la Aplicación de una Política de Tarificación de Infraestructuras a los Vehículos Pesados. *IX Congreso de Ingeniería del Transporte*.
- Mackie, P. (2005). The London congestion charge: a tentative economic appraisal. A comment on the paper by Prud'homme and Bocarejo. *Transport Policy* 12, 288–290.
- Madridejos, A. (2018). La contaminación por NO2 sigue sin mejorar en el área de Barcelona.
- Magrinya, F. (2008). Mobilité durable et qualité urbaine: les quartiers de Gracia, Poblenou et El Prat de Llobregat (Barcelone). *Urbia, Les Cahiers Du Développement Urbain Durable*, 43–66. Retrieved from [http://www.unil.ch/webdav/site/ouvdd/shared/URBIA/urbia\\_07/urbia\\_07\\_complet.pdf](http://www.unil.ch/webdav/site/ouvdd/shared/URBIA/urbia_07/urbia_07_complet.pdf)
- Manzo, S. (n.d.). Investigating uncertainty in BPR formula parameters: a case study.
- Marcucci, E., Gatta, V., & Scaccia, L. (2015). Urban freight, parking and pricing policies: An evaluation from a transport providers' perspective. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 74, 239–249. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.02.011>
- Marklund, P. and S. E. (2007). What is driving the EU burden-sharing agreement: Efficiency or equity? *Journal of Environmental Management*, 85(2), 317–329.
- Mauttone, A. (2002). Modelos de demanda.
- May, A. D., & Milne, D. S. (2000). Effects of alternative road pricing systems on network performance. *Transportation Research Part A-Policy and Practice*, 34(6), 407–436. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(99\)00015-4](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(99)00015-4)
- May, A. D., Liu, R., Shepherd, S. P., & Sumalee, A. (2002). The impact of cordon design on the performance of road pricing schemes. *Transport Policy*, 9(3), 209–220. [https://doi.org/10.1016/S0967-070X\(02\)00031-8](https://doi.org/10.1016/S0967-070X(02)00031-8)
- May, A. D., & Milne, D. S. (2000). Effects of alternative road pricing systems on network performance. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 34(6), 407–436. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(99\)00015-4](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(99)00015-4)
- May, A., Shepherd, S., & Sumalee, A. (2004). 4. Optimal Locations and Charges for Cordon Schemes. *Research in Transportation Economics*, 9(04), 87–105. [https://doi.org/10.1016/S0739-8859\(04\)09004-3](https://doi.org/10.1016/S0739-8859(04)09004-3)
- Mcrit. (2008). Repartiment modal en el continu urbà de Barcelona. *Generalitat de Catalunya. Departament de Política Territorial i Obres Públiques*.
- Medina-tapia, M. (2019). Implementation of Connected and Autonomous Vehicles in Cities Could Have Neutral Effects on the Total Travel Time Costs: Modeling and Analysis for a Circular City. <https://doi.org/10.3390/su11020482>
- Meland, S., Tretvik, T., & Welde, M. (2010). The effects of removing the Trondheim toll cordon. *Transport Policy*, 17(6), 475–485. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.05.001>

- META Consortium, Robusté, F., Saurí, S., Salas, M., Monzón, A., Vassallo, J. M., ... Condeço-Melhorado, A. (2009). Modelo Español de Tarifación de Carreteras. *Centro de Estudios y Experimentación de Obra Pública CEDEX*, 1–110.
- Meta, E. C. (2011). Modelo Español de Tarifación de Carreteras marzo de 2011.
- Migliore, M., Burgio, A. Lo, & Di Giovanna, M. (2014). Parking pricing for a sustainable transport system. *Transportation Research Procedia*, 3(July), 403–412.  
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.021>
- Ministerio Fomento. (2013). El Transporte Urbano y Metropolitano en España - junio 2013. *Ministerio de Fomento. Gobierno de España*. Retrieved from  
[http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/02ED782D-0A8E-462B-83D0-CCE67E4B51CD/118656/El\\_Transporte\\_Urbano.pdf](http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/02ED782D-0A8E-462B-83D0-CCE67E4B51CD/118656/El_Transporte_Urbano.pdf)
- Minken, H.; Fridstrøm, L.; Arild Vold, A. (2001). Vegprising i Oslo-området. *TØI Working Paper*, 507.
- Mitchell, G., Namdeo, A., & Milne, D. (2005). The air quality impact of cordon and distance-based road user charging: An empirical study of Leeds, UK. *Atmospheric Environment*, 39(33), 6231–6242.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.07.005>
- Mohring, Herbert; Harwitz, M. (1962). Highway benefits: an analytical framework. *Northwestern University Press*.
- Mun, S., Konishi, K., & Yoshikawa, K. (2003). Optimal cordon pricing. *Journal of Urban Economics*, 54(1), 21–38. [https://doi.org/10.1016/S0094-1190\(03\)00022-6](https://doi.org/10.1016/S0094-1190(03)00022-6)
- Musa, S. (2016). Smart Cities - A Roadmap for Development. *Journal of Telecommunications System & Management*, 05(03). <https://doi.org/10.4172/2167-0919.1000144>
- Nash, C. & Sansom, T. (2001). Pricing European transport systems: Recent developments and evidence from case studies. *Journal of Transport Economics and Policy*, 35 (3), 363–380.
- Newbery, D. M. (1990). Pricing and congestion: economic principles relevant to road pricing. *Oxford Review of Economic Policy*, 6(1), 22–38.
- Newmark, G. L. (2009). Comparing Socially Distinct Travel Adaptations to Land Use Change. *Transportation Research Board Annual Meeting 88<sup>th</sup>, Washington DC*.
- Nielsen, O. A. (1996). Do Stochastic Traffic Assignment Models Consider Differences in Road Users Utility Functions? *24<sup>th</sup> European Transport Forum (PTRC Annual Meeting)*, 46–47.
- Nowacki, G. (2011). Polish Researches on Electronic Toll Collection, *18(2)*, 1–8.
- Nowacki, G., Smoczynska, E., & Niedzicka, A. (2010). The pilot project of the National Automatic Toll Collection System for Poland. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 50–57.  
<https://doi.org/10.3182/20101005-4-RO-2018.00019>
- Odeck, J., and S. B. (2002). Toll Financing in Norway: The Success, the Failures and Perspectives for the Future. *Transport Policy*, 9, 253–260.

- Ortega Hortelano, A. (2014). Optimización del peaje en autopistas interurbanas que compiten con carreteras convencionales libres de pago: una perspectiva de eficiencia y equidad. *Tesis Doctoral UPM ETSICCP*.
- Ortúzar, J. (2000). Modelos de demanda de transporte. Alfaomega Grupo Editor.
- Pahaut, S., & Sikow, C. (2006). History of thought and prospects for road pricing. *Transport Policy*, 13(2), 173–176. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.11.012>
- Palma, A. D., Lindsey, R., and Proost, S. (2006). Research challenges in modelling urban road pricing: An overview. *Transport Policy*, 13 (2), 97-105.
- Papí Ferrando, J. F. (2011). El Peaje Urbano de Londres. *Carreteras*, 4(177), 68–75.
- Parry, I.W.H., Bento, A. M. (2001). Revenue recycling and the welfare effects of road pricing. *Scandinavian Journal of Economics*, 103, 645–671.
- Persad, K., Walton, M., & Hussain, S. (2007). Toll Collection Technology and Best Practices. *Project 0-5217: Vehicle/License Plate Identification for Toll Collection Applications. Center for Transportation Research the University of Texas at Austin.*, 1–38.
- Pierce, G., Willson, H., & Shoup, D. (2015). Optimizing the use of public garages: Pricing parking by demand. *Transport Policy*, 44, 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.07.003>
- Pigou A.C. (1920). The Economyics of Welfare. *MacMillan London*.
- Pons-rigat, A. (2016). Matching funding, mobility and spatial equity objectives in a network-wide road pricing model: Case of Catalonia, Spain, 1–20.
- Pozueta Echavarri, J. (2008). La experiencia internacional en peajes urbanos. *Instituto Juan de Hera. Cuadernos de Investigacion Urbanística*, 58.
- Prozzi, J. P., Victoria, I. C., Walton, C. M., and Prozzzi, J. A. (2007). Identifying, Measuring, and Mitigating Environmental Justice Impacts of Toll Roads. *Transportation Research Board Annual Meeting 86<sup>th</sup>, Washington DC*.
- Prud'homme, R.; Bocarejo, J. (2005). The London congestion charge: a tentative economic appraisal. *Transport Policy*, 12(3), 279–287.
- Prud'homme, R., Kopp, P., & Evaluation, A. E. (2006). The Stockholm Toll, 1–38.
- Ramjerdi, F. (1995). *Road pricing in urban areas: financing investment in transportation infrastructure and improving resource allocation, the case of Oslo*. Royal Institute of Technology.
- Ramjerdi, F., Minken, H., & Østmoe, K. (2004). 10. Norwegian Urban Tolls. *Research in Transportation Economics*, 9(04), 237–249. [https://doi.org/10.1016/S0739-8859\(04\)09010-9](https://doi.org/10.1016/S0739-8859(04)09010-9)
- Raux, C. (2005). Comments on ‘The London congestion charge: a tentative economic appraisal’ *Transport Policy* 12, 368–371.
- Ricci, A., C. Sessa, C.A. Nash, R. Macário, M. Van der Hoofd, M. Carmona, S. Proost, A. D. P. (2006). Synthesis and Policy Conclusions, REVENUE Project Deliverable 6, Funded by 5<sup>th</sup> Framework RTD Programme, ISIS, Rome.

- Rich, Jeppe and Anker Nielsen, O. (2007). A socio-economic assessment of proposed road user charging schemes in Copenhagen. *Transport Policy*, 14, 330–345.
- Richards, M. (1992). Road pricing: International experience. *Congestion Pricing Symposium. June 10-12 Organized by the FHWA Publication No. FHWA-PL-93-003, 2.1-2.10.*
- Richardson, H. W. (1974). A note on the distributional effects of road pricing. *Journal of Transport Economics and Policy*, 82–85.
- Riera, P. N. T. (1999). Efectos sobre la equidad y eficiencia de la política de peajes de autopistas. *Papeles de economía española*, 82.
- Robuste, F. (1987). Elección de alternativas de transporte con el proceso de jerarquización analítica: pros y contras. *Revista Del Ministerio de Transporte, Turismo y Comunicaciones. Gobierno de España.*, 28, 25–36.
- Robusté, F. (2002). El peaje en autopistas como precio por un servicio y como garante de sostenibilidad. *Revista de Obras Públicas*, 149 (3425), 127–139.
- Robusté, F. S. (1999). Sistemas tarifarios del vehículo privado en medio urbano. *Ministerio de Fomento. Gobierno de España.*
- Robusté, F; Vergar, C; Thorson, Lief; Estrada, M. (2003). Nuevas tecnologías en la gestión. *Centro de Innovación Del Transporte. CENIT.*
- Rodriguez, M. A. (2009). Who Gets a Train Station? Toward Understanding Racial Equity in FTA New Starts Program Using Buffer Analysis. *Transportation Research Board Annual Meeting 88<sup>th</sup>, Washington DC.*
- Rotaris, L., Danielis, R., Marcucci, E., & Massiani, J. (2010). The urban road pricing scheme to curb pollution in Milan, Italy: Description, impacts and preliminary cost-benefit analysis assessment. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(5), 359–375.  
<https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.03.008>
- Rouhani, O. M., Oliver Gao, H., & Richard Geddes, R. (2015). Policy lessons for regulating public–private partnership tolling schemes in urban environments. *Transport Policy*, 41, 68–79.  
<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.03.006>
- Rouwendal, J., & Verhoef, E. T. (2006). Basic economic principles of road pricing: From theory to applications. *Transport Policy*, 13(2), 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.11.007>
- Rueda Palenzuela, S. (2011). El urbanismo ecológico. <http://Urban-e.Aq.Upm.Es, 1–22>
- Rueda, S. (2016). La supermanzana, nueva célula urbana para la construcción de un nuevo modelo funcional y urbanístico de Barcelona.
- Rye, T., Gaunt, M., & Ison, S. (2008). Edinburgh’s Congestion Charging Plans: An Analysis of Reasons for Non-Implementation. *Transportation Planning and Technology*, 31 (6), 641–661.
- Salas Rondón, M. H. (2008). Análisis de estrategias tarifarias para la gestión de la movilidad en carreteras metropolitanas. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya.

- Salas Rondón, M., Robusté, F., & Sauri, S. (n.d.). Evaluación de efectos al implantarse una estructura tarifaria combinada sobre una red de vías metropolitanas congestionadas.
- Salas Rondón, Miller; Robusté, F. (2004). Valoración del excedente de usuario al implementar road-pricing kilométrico en entornos metropolitanos. *Revista Ingeniería Del Transporte*, 13, 41–46.
- Salda, P., Investigador, A., Magro, V., Titular, P., & Investigador, S. T. (2012). Sistemas electrónicos de cobro de peaje. La experiencia en Europa. *Revista de Obras Públicas. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de España*.
- Saldaña. (2012). Hacia un nuevo modelo de concesiones de autopistas integrales: el modelo OASIS.
- Salvador, 1941- Tarragó Cid. (1972). El “Plà Macià” o “la nova Barcelona”: 1931-1938. *Cuadernos de Arquitectura y Urbanismo*, (90), 24–36. Retrieved from <http://www.raco.cat/index.php/CuadernosArquitecturaUrbanismo/article/view/111450/139047>
- Sanchez, T., Makarewicz, C., Haas P., and D. C. (2007). Transportation Costs, Inequities, and Trade-Offs. *Transportation Research Board Annual Meeting 86<sup>th</sup>*, Washington DC.
- Sanchez, T.W., Upton, A., Jones, P., and Lucas, K. (2007). Integrating Urban Service Delivery Research for Distributional Analyses and Transport Equity. *Transportation Research Board Annual Meeting 86<sup>th</sup>*, Washington DC.
- Santamarin, E., Novoa, A. M., Racioppi, F., Olabarria, M., & Pe, K. (2006). Health impact of motorised trips that could be replaced by walking. <https://doi.org/10.1093/eurpub/cks015>
- Santos, G., and Rojey, L. (2014). Distributional impacts of road pricing: The truth behind the myth. *Transportation*, 31, 2142.
- Santos, G., Button, K., Noll, R. G. (2008). London Congestion Charging. *Brook. -Whart. Pap. Urban Aff.*, (January 2008), 177–234. <https://doi.org/10.1353/urb.0.0003>
- Santos, G., Shaffer, B. (2004). Preliminary results of the London congestion charging scheme. *Public Works Manage., Policy* 9, 164.
- Santos, G. (2006). Road pricing. Lessons from London. *Economic Policy*, (April), 265–308.
- Santos, G. (2004). Urban road pricing in the U.K. *Research in Transportation Economics*, 9(04), 251–282. [https://doi.org/10.1016/S0739-8859\(04\)09011-0](https://doi.org/10.1016/S0739-8859(04)09011-0)
- Santos, G. (2003). Double Cordon Tolls in Urban Areas to Increase Social Welfare, (02), 53–59.
- Santos, G., & Bhakar, J. (2006). The impact of the London congestion charging scheme on the generalised cost of car commuters to the city of London from a value of travel time savings perspective. *Transport Policy*, 13(1), 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.07.002>
- Santos, G., Newbery, D., & Rojey, L. (2001). Static Versus Demand-Sensitive Models and Estimation of Second-Best Cordon Tolls an Exercise for Eight English Towns, (January). <https://doi.org/10.3141/1747-06>
- Santos, G., & Rojey, L. (2004). Distributional impacts of road pricing: The truth behind the myth. *Transportation*, 31(1), 21–42. <https://doi.org/10.1023/B:PORT.0000007234.98158.6b>

- Sattayhatewa, P., & Smith, R. (2003). Development of Parking Choice Models for Special Events. *Transportation Research Board*, 1858.
- Schade, J., & Baum, M. (2007). Reactance or acceptance? Reactions towards the introduction of road pricing. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41(1), 41–48.  
<https://doi.org/10.1016/j.tra.2006.05.008>
- Schade, W., and Rothengatter, W. (2003). Improving assessment of transport policies by dynamic cost-benefit analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1839, 107 – 114.
- Schaller, B. (2010). New York City's congestion pricing experience and implications for road pricing acceptance in the United States. *Transport Policy*, 17(4), 266–273.  
<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.01.013>
- Schuitema et al. (2010). Explaining differences in acceptability before and acceptance after the implementation of a congestion charge in Stockholm. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44, 99–109.
- Schweitzer, L., and Taylor, B. (2008). Just pricing: the distributional effects of congestion pricing and sales taxes. *Transportation*, 35, 797 – 812.
- Seik, F. T. (2000). An advanced demand management instrument in urban transport. Electronic road pricing in Singapore. *Cities*, 17(1), 33–45. [https://doi.org/10.1016/S0264-2751\(99\)00050-5](https://doi.org/10.1016/S0264-2751(99)00050-5)
- Serrallonga, J. M. B., & González, J. S. (n.d.). El Peaje Urbano: Aspectos Clave Para Su Estudio Y Aplicación. *Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de España*, 1–17.
- Sheffi, Y. (1985). Urban Transport Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods. *Pretinice-Hall, Eglewood Cliffs*.
- Shivam Gupta. (2010). (Stochastic) User Equilibrium, 1, 2–3.
- SIKA. (2002). Översyn av samhällsekonomiska metoder och kalkylvärden på transportområdet (ASEK). SIKARapport 2002, 4.
- Slavin, H., Lam, J., & Nanduri, K. (2015). Traffic Assignment and Feedback Research to Support Improved Travel Forecasting. *Federal Transit Administration Office of Planning and Environment*, 328. Retrieved from <http://www.caliper.com/PDFs/traffic-assignment-and-feedback-research-to-support-improved-travel-forecasting.pdf>
- Small, K. (1992). Urban transportation economics. *Harwood Academic Publishers*.
- Small, K; Gómez-Ibañez, J. A. (1998). Road pricing for congestion management: The transition from theory to policy. *J. K. Button & E. Verhoef (Eds.)*.
- Small, K. (1992). Fundamentals of Pure and Applied Economics Series. *Urban Transportation Economics*, 51.
- Small, K. a, & Gomez-Ibanez, J. a. (1998). Road Pricing for Congestion Management: The Transition from Theory to Policy. *University of California. Transportation Center*, (391). Retrieved from [http://econpapers.repec.org/scripts/redir.pf?u=http://www.escholarship.org/uc/item/8kk909p1.pdf;or\\_igin=repeccitec;h=repec:cdl:uctcwp:qt8kk909p1%5Cnhttp://www.uctc.net/papers/391.pdf](http://econpapers.repec.org/scripts/redir.pf?u=http://www.escholarship.org/uc/item/8kk909p1.pdf;or_igin=repeccitec;h=repec:cdl:uctcwp:qt8kk909p1%5Cnhttp://www.uctc.net/papers/391.pdf)

- Smith, M. J. (1979). The marginal cost pricing of a transportation network. *Transportation Research*, 13(3), 237–242.
- Smith, M. J. et al. (1994). A comparison of the network effects of four road-user charging systems. *Traffic Engineering & Control Engineering and Control*, 35 (5).
- Song, M., & Li, Y. (2012). Feasibility Study of Urban Road Congestion Pricing. *2012 Fifth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, 564–567.  
<https://doi.org/10.1109/ICICTA.2012.148>
- Soriguera, F., Rosas, D., & Robusté, F. (2010). Travel time measurement in closed toll highways. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(10), 1242–1267.  
<https://doi.org/10.1016/j.trb.2010.02.010>
- Stackelberg, G. E. (1952). *The Theory of Market Economy*. Oxford University Press.
- Steg, L. and Schuitema, G. (2007). Behavioural responses to transport pricing: A theoretical analysis. *T. Gärling & L. Steg (Eds.). Threats to the Quality of Urban Life from Car Traffic: Problems, Causes, and Solution*, 347–366.
- Stopher. (1996). SMART: simulation model for activities, resources and travel. *Transportation*, 23, 293–312.
- Texas Transportation Institute. (2009). Urban mobility report 2007. *Transportation*, (July).
- Thomson, J. M. (1998). Reflections on the economics of traffic congestion. *Journal of Transport Economics and Policy*, 32(1), 93–110.
- Toh, R. S., & Phang, S.-Y. (1997). Curbing Urban Traffic Congestion in Singapore: A Comprehensive Review. *Transportation Journal (American Society of Transportation & Logistics Inc)*, 37(2), 24–33.
- TRB. (2003). *International Perspectives on Road Pricing*. Retrieved from [www.trb.org/publications/conf/cp34roadpricing.pdf](http://www.trb.org/publications/conf/cp34roadpricing.pdf)
- Tretvik, T. (2003). Urban Road Pricing in Norway: Public Acceptability and Travel Behaviour. In *Acceptability of Transport Pricing Strategies* (pp. 77–92). <https://doi.org/10.1108/9781786359506-005>
- Tsekeris, T. (2009). Design and evaluation of road pricing: State-of-the-art and methodological advances. *NETNOMICS: Economic Research and Electronic Networking*, Volume 10(1), 2009), 552.
- Turró, M. (2010). La evaluación de proyectos de inversión en transporte por parte de las instituciones internacionales: la experiencia del Banco Europeo de Inversiones. *Cuadernos Economicos Del ICE*.
- Ungemah, D. (2007). I'll tell you what I think! A national review of how the public perceives pricing. *Transportation Research Record*, (1996), 66–73.
- Van den Berg, V., and Verhoeff, E. (2011). Winning or losing from dynamic bottleneck congestion pricing? The distributional effects of road pricing with heterogeneity in values of time and schedules delay. *Journal of Public Economics*, 95, 983 – 992.

- Vassallo, J.M., and Izquierdo, R. (2010). *Infraestructura pública y participación privada. Conceptos y experiencias en América y en España*.
- Vickrey, W. (1963). Pricing in urban and suburban transport. *American Economic Review: Paper and Proceedings*, 53(2), 452–465.
- Viechnicki, P. et al. (2015). Smart mobility: Reducing congestion and fostering faster, greener, and cheaper transportation options. *Deloitte University Press*.
- Viegas, J. M. (2001). Making urban road pricing acceptable and effective: searching for quality and equity in urban mobility. *Transport Policy*, 8(4).
- Vonk Noordegraaf, D., Annema, J. A., & van Wee, B. (2014). Policy implementation lessons from six road pricing cases. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 59, 172–191. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.11.003>
- Vozzi, L. M., & Acquaviva, L. A. (2011). Modelización Del Sistema De Transporte De Rosario. *Mecánica Computacional*, XXX, 2891–2903.
- Wachs, M. (2005). Then and now the evolution of congestion pricing in transportation and where we stand today. *Conference Proceedings 34: International Perspectives on Road Pricing. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC*.
- Walters, A. A. (1961). The Theory and Measurement of Private and Social Costs of Highway Congestion. *Econometrica*, 29, 676–699.
- Wang, J. Y. T., Lindsey, R., & Yang, H. (2011). Nonlinear pricing on private roads with congestion and toll collection costs. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(1), 9–40. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2010.05.004>
- Wang, R. (2010). Shaping urban transport policies in China: Will copying foreign policies work? *Transport Policy*, 17(3), 147–152. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.01.001>
- Weijde, A. H. van der, & Berg, V. A. C. van den. (2013). Stochastic User Equilibrium Traffic Assignment with Price-sensitive Demand: Do Methods matter (much)? *Tinbergen Institute Discussion Papers*. Retrieved from <http://ideas.repec.org/p/tin/wpaper/20130209.html>
- West, J. (2017). The Gothenburg congestion charges: CBA and equity 1 INTRODUCTION. *Centre for Transport Studies, KTH Royal Institute of Technology*, 1–27.
- West, J., & Börjesson, M. (n.d.). The Gothenburg Congestion charges: CBA and equity, 1–34.
- Wilson. (1998). Welfare effects of congestion pricing in Singapore. *Transportation* 15, 191–210.
- Winkler, M., Fan, W., & Gurmu, Z. (2013). Congestion pricing and optimal tolling: The importance of both locations and levels. *2013 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems, IEEE-CYBER 2013*, 331–336. <https://doi.org/10.1109/CYBER.2013.6705468>
- Winslott Hiselius, L., Brundell-Freij, K. (2007). Time Inconsistencies in Preferences – A Case Study of Congestion Charges in Stockholm. *World Conference of Transport Research, Berkeley*.

- Winslott-Hiselius, L., Brundell-Freij, K., Vagland, Å., & Byström, C. (2009). The development of public attitudes towards the Stockholm congestion trial. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43(3), 269–282. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.09.006>
- Winston, C., Langer, A., & Berkeley, U. C. (2004). Final Report to the Federal Highway Administration. *Transportation*, (October).
- Xie, L., & Olszewski, P. (2011). Modelling the effects of road pricing on traffic using ERP traffic data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 45(6), 512–522. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.03.006>
- Yang, H & Huang, H. J. (1998). Principle of marginal-cost pricing. How does it work in a general road network? *Transportation Research*, 32, 45–54.
- Young. (1991). A review of urban parking models. *Transport Reviews*, 11, 63–84.
- Young, W., & Miles, C. F. (2014). A spatial study of parking policy and usage in Melbourne, Australia. *Case Studies on Transport Policy*, 3(1), 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2014.07.003>
- Zandbergen, H. J. S. A. J. (1990). Road Pricing the investigation of the Dutch Rekening Rijden system. *Ministry of Transport and Public Works, The Netherlands*.
- Zhang Aki, F., Hudson, W.R., Z. (2002). Developing an Integrated Management System for the Urban Transportation Infrastructure. *University of Texas. Center for Transportation Research*, (SWUTC/02/167511-1).
- Zhang, H. Y.; Zhou, X. (2009). Congestion pricing location problem of multi-class network with social and spatial equity constraints. *J. Syst. Eng.*, 24(2), 184–189.
- Zhang, L. (2009). Vehicle Mileage Fee on Income and Spatial Equity. Short- and Long-Run Impacts. *Transportation Research Board*, 215, 110–118.
- Zhang, R., & Zhu, L. (2016). Curbside parking pricing in a city centre using a threshold. *Transport Policy*, 52, 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.06.008>
- Zhang, W., & Kockelman, K. M. (2016). Congestion pricing effects on firm and household location choices in monocentric and polycentric cities. *Regional Science and Urban Economics*, 58, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2016.01.002>
- Zhang, X., & Yang, H. (2004). The optimal cordon-based network congestion pricing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 38(6), 517–537. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2003.08.001>
- Zhikai. (2008). Equity Effects of Congestion Pricing on Urban Road Resources Allocation'. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 8 (1), 74 – 79.
- Zupan, J. M., Fellow, S., & Perrotta, A. F. (2003). An Exploration of Motor Vehicle Congestion Pricing in New York, (November).

## ANEJOS

### ANEJO A. Síntesis de las principales experiencias en peaje urbano

#### A. 1 Singapur. Electronic Road Pricing

Población (2014): 5,5 millones de habitantes.

Antecedentes: altísimas tasas de motorización. Territorio reducido, alta densidad de población. Previsión de altos niveles de congestión. En 1972 se establece una tasa por la posesión de automóviles.

Objetivo: reducción y gestión de la congestión.

Tipo de peaje: peaje anticongestión para acceso a área restringida en el distrito financiero.

Proceso institucional: decisión directa del Gobierno del Estado.

Fecha de inicio de los trabajos: 1972.

Inauguración del sistema actual: en 1975 se implementa el sistema con funcionamiento convencional llamado “área licensing scheme (ALS)”. En 1998 se mejora el sistema implementando un sistema de pago electrónico llamado “Electronic Road Pricing (ERP)”.

Superficie del ámbito: 7,2 Km<sup>2</sup>.

Puntos de control: 33.

Horario de funcionamiento: laborales de 7:30h a 18:30h.

Tarifas (2006): hasta 1,5 € por entrada. La tarifa es variable por hora y punto de acceso. En el caso de motocicletas la tarifa presenta un descuento del 50%, mientras que los caminos y autobuses pagan más que los vehículos convencionales. Exenciones de pago para ambulancias, bomberos y policías.

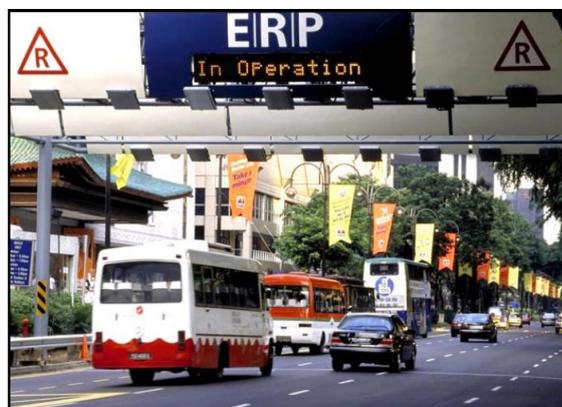


Figura A. 1. Singapur. Electronic Road Pricing.

## A. 2 Bergen (Noruega): “Toll Ring”.

Población (2017): 250.000 habitantes (340.000 en el área metropolitana).

Antecedentes: 1983, la Dirección General de Carreteras propuso instalar un peaje urbano a fin de recaudar fondos para proyectos de carreteras. El proyecto fue apoyado por los tres principales partidos del ayuntamiento y por los dos nacionales. El Estado acordó aportar para los proyectos el mismo presupuesto que el resultante del peaje.

Objetivos: obtener fondos para la red de carreteras, por un periodo de 15 años, desde 1986. En 2002, se renueva hasta el 2011 con una subida de tarifas.

Tipo de peaje: esquema tipo cordón, se paga el peaje al cruzar la zona afectada, controlada con cámaras a través de un sistema de lectura automática de matrículas a la entrada del peaje.

Proceso institucional: aprobación por el Ayuntamiento, con apoyo de los principales partidos, y aprobación por el Parlamento Noruego. El peaje es operado por una compañía de capital público.

Fecha de inicio de los trabajos: 1983.

Inauguración del sistema actual: en 1986 se inaugura el sistema convencional y en 2004 se implementa un sistema electrónico que automatiza el proceso de pago.

Superficie del ámbito: unos 35 Km<sup>2</sup> donde vive el 10% de la población de Bergen.

Estaciones de peaje: 14.

Horario de funcionamiento: 24 horas, 7 días a la semana (desde febrero 2004).

Tarifas: a continuación, se adjuntan tarifas del peaje urbano de Bergen. Los vehículos registrados en el sistema Autopass (que utilizan TAG) de menos de 3,5 tn presentan descuentos del 20% y pueden pasar durante una hora por más de una estación de peaje sin costes adicionales. Los vehículos eléctricos y de hidrogeno están exentos del peaje.

Vehículos <3.5t	Precio final - NOK	Con AutoPASS (-20%) - NOK	Eléctrico e hidrógeno
Hora pico - <b>diesel</b> 06:30-09:00 and 14:30-16:30	54	43,20	0
Hora pico - <b>gasolina e híbrido</b> 06:30-09:00 and 14:30-16:30	49	39,20	0
Fuera de la hora punta y los sábados y domingos - <b>diesel</b>	29	23,20	0
Fuera de la hora punta y los sábados y domingos - <b>gasolina e híbrido</b>	24	19,20	0

Tabla A. 1. Tarifas para vehículos de menos de 3,5 tn en Bergen. Fuente: <http://urbanaccessregulations.eu/>

Vehículos > 3.5t	Precio final - NOK (AutoPASS obligatorio)	Eléctrico e hidrógeno
<b>Hora pico - menos que el estándar Euro VI</b> 06:30-09:00 and 14:30-16:30	118	0
<b>Hora pico - min. estándar Euro VI</b> 06:30-09:00 and 14:30-16:30	72	0
<b>Fuera de la hora punta y los sábados y domingos - menos que el estándar Euro VI</b>	67	0
<b>Fuera de la hora punta y los sábados y domingos - min. estándar Euro VI</b>	36	0

Tabla A. 2. Tarifas para vehículos de más de 3,5 tn en Bergen. Fuente: <http://urbanaccessregulations.eu/Sistema de cobro>: mediante transpondedor “TAG” o vía web con tarjeta crédito. El TAG se puede adquirir en una estación de servicio por 21€ que serían reembolsables con su devolución.

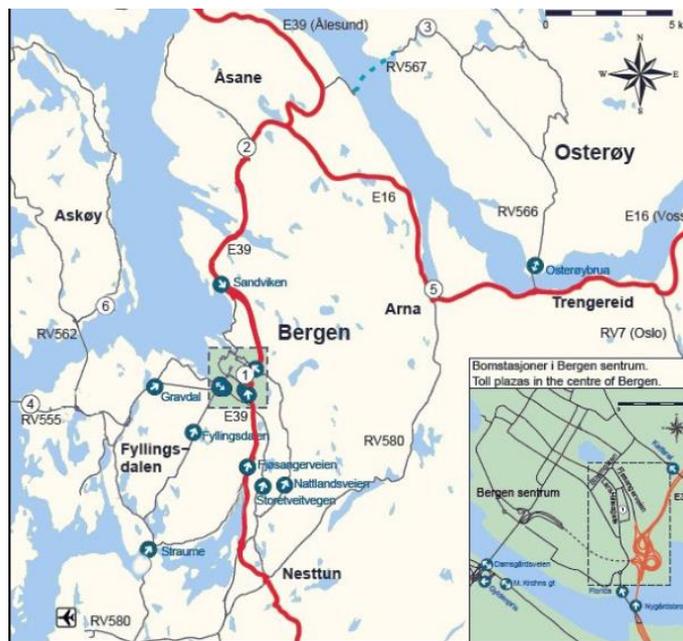


Figura A. 2. Límites del peaje urbanos de Bergen. Fuente: <http://urbanaccessregulations.eu/>

### A. 3 Haugesund (Noruega)

Población (2016): 36.931 habitantes.

Antecedentes: de igual modo que en el caso del peaje urbano de Bergen, este peaje nace para financiar el plan de infraestructuras de la región de Haugalandet.

Objetivos: reducir la contaminación del aire originada por las emisiones de los vehículos automotores y utilizar los fondos recaudados para financiar proyectos de mejora del transporte público.

Tipo de peaje: esquema tipo cordón, se paga el peaje al cruzar la zona afectada, controlada con cámaras a través de un sistema de lectura automática de matrículas a la entrada del peaje.

Inauguración del sistema: julio de 2008

Puntos de control: 7

Horario de funcionamiento: laborables de 06:00h a 18:00h.

Tarifas: vehículos de menos de 3.5 Tn 11 NOK, vehículos de más de 3.5 Tn 18 NOK. Descuentos con sistema Autopass.

Exenciones: transporte público, vehículos al servicio de la administración, motocicletas, ciclomotores, vehículos eléctricos y de hidrogeno, conductores con movilidad reducida.

Sistema de cobro y control: es necesario un registro inicial del vehículo (sistema Autopass). El sistema está totalmente automatizado y envía una factura electrónica por internet o correo ordinario con el uso realizado del peaje.



Figura A. 3. Límites del peaje urbano. En azul las estaciones de peaje. En naranja la autopista. En amarillo las calles afectadas por la tasa. Fuente: <http://urbanaccessregulations.eu/>

#### A. 4 Kristiansand (Noruega)

Población (2016): 88.447 habitantes.

Antecedentes: el peaje tipo cordón de Kristiansand comenzó a finales de 1997 con una única estación de peaje. A principios del 2000 se abrieron tres nuevas estaciones de peaje. Los ingresos del plan contribuirían a financiar aproximadamente el 56% de un proyecto de infraestructura vial que se estimó en 920 millones NOK a precios del 2002. El funcionamiento del sistema fue inicialmente manual con una tarifa diaria de 10 NOK.

Objetivos: inicialmente recaudar fondos para financiar proyectos de infraestructuras.

Tipo de peaje: inicialmente fue un esquema tipo cordón que se pagaba al cruzar el área afectada. Actualmente es una combinación de peaje por congestión y zona de bajas emisiones. El sistema actual de control se realiza mediante cámaras que disponen de un sistema de reconocimiento automático de matrículas ANPR.

Inauguración del sistema: año 1997.

Puntos de control: 5.

Horario de funcionamiento: laborables de 06:00h a 18:00h.

Tarifas: vehículos de menos de 3.5 Tn 21 NOK, vehículos de más de 3.5 Tn 36 NOK. Descuentos con sistema Autopass.

Exenciones: transporte público, vehículos al servicio de la administración, motocicletas, ciclomotores, vehículos eléctricos y de hidrogeno, conductores con movilidad reducida. Los residentes con tarjeta de estacionamiento registrada pueden utilizar las carreteras de peaje alrededor de Oslo, Bergen, Stavanger (Nord-Jaeren), Trondheim, Tonsberg, Namsos y Kristiansand.

Sistema de cobro y control: es necesario un registro inicial del vehículo (sistema Autopass). El sistema está totalmente automatizado y envía una factura electrónica por internet o correo ordinario con el uso realizado del peaje.

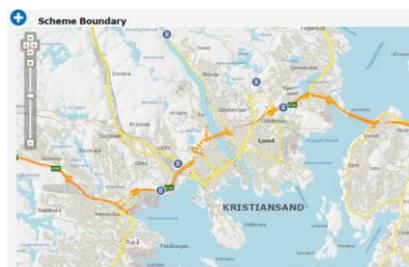


Figura A. 4. Esquema límites peaje. En azul las estaciones de peaje. En naranja la autopista. En amarillo las calles afectadas por la tasa. Fuente: <http://urbanaccessregulations.eu/>

## A. 5 Namsos (Noruega)

Población (2016): 13.010 habitantes.

Antecedentes: En 2003, la pequeña comunidad de Namsos, introdujo un anillo de peaje, probablemente el anillo de peaje más pequeño del mundo (Farideh Ramjerdi et al., 2004).

Objetivos: reducir la contaminación del aire originada por las emisiones de los vehículos automotores y utilizar los fondos recaudados para financiar proyectos de mejora del transporte público.

Tipo de peaje: esquema tipo cordón que se paga al cruzar el área afectada. El sistema de control se realiza mediante cámaras que disponen de un sistema de reconocimiento automático de matrículas ANPR.

Inauguración del sistema: año 2003.

Puntos de control: 4.

Horario de funcionamiento: laborables de 06:00h a 18:00h.

Tarifas: vehículos de menos de 3.5 Tn 14 NOK, vehículos de más de 3.5 Tn 25 NOK. Descuentos con sistema Autopass.

Exenciones: transporte público, vehículos al servicio de la administración, motocicletas, ciclomotores, vehículos eléctricos y de hidrogeno, conductores con movilidad reducida. Los residentes con tarjeta de estacionamiento registrada pueden utilizar las carreteras de peaje alrededor de Oslo, Bergen, Stavanger (Nord-Jaeren), Trondheim, Tonsberg, Namsos y Kristiansand.

Sistema de cobro y control: es necesario un registro inicial del vehículo (sistema Autopass). El sistema está totalmente automatizado y envía una factura electrónica por internet o correo ordinario con el uso realizado del peaje.



Figura A. 5. Esquema límites peaje. En azul las estaciones de peaje. En naranja la autopista. En amarillo las calles afectadas por la tasa. Fuente: <http://urbanaccessregulations.eu/>

## A. 6 Oslo (Noruega). “Toll Ring”.

Población (2017): 522.000 habitantes (1 millón en el área metropolitana).

Antecedentes: fuerte aumento de la congestión en las carreteras e insuficiencia de la red de transporte. Plan de construcción de infraestructuras en Oslo (“Oslo Package 1”) que incluyó un paquete de 50 proyectos en infraestructuras de transporte a 35 años. Peaje urbano de Bergen como precedente en 1986.

Objetivos: financiar la construcción de 50 proyectos de infraestructura vial y de transporte público. Con la implementación del peaje urbano el plazo de ejecución de estos proyectos se reduciría de 35 a 10 años. Inicialmente se estima que el peaje urbano aportaría el 55% de los recursos y necesitaría estar operativo duraría 16 años, es decir hasta 2007.

Tipo de peaje: en cordón por utilización de infraestructura viaria exterior en anillo.

Proceso institucional: En 1984, el Parlamento solicitó un plan en la ciudad que, en 1986 presentó un libro blanco en el que ya se consideraba el peaje. En 1987 el ayuntamiento de Oslo y el Condado de Akershus aprueban el peaje, con el apoyo de los principales partidos y constituyen una “joint venture”, Oslo (60%) y Akershus (40%). En 1988, el peaje es aprobado por el Parlamento.

Fecha de inicio de los trabajos: 1984.

Inauguración del sistema actual: 1 de febrero de 1990.

Superficie del ámbito: 31 Km<sup>2</sup>.

Puntos de control: 19.

Horario de funcionamiento: 24 horas al día, 7 días a la semana.

Tarifas: los vehículos registrados en el sistema Autopass (que utilizan TAG) de menos de 3,5 tn presentan descuentos. Los vehículos eléctricos y de hidrogeno están exentos del peaje. Se considera hora punta de lunes a viernes 6:30-9:00 y de 15:00-17:00h. Las fiestas oficiales, mes de julio, víspera de Navidad y de año nuevo no se aplica el peaje urbano.

Oslo Vehículos con <3.5t	Gasolina / PHEV	Diesel	Eléctrico e hidrógeno
	NOK	NOK	NOK
No hay hora punta	45	50	0
Con AutoPASS	40,50	45	0
Hora punta	55	60	0
Con AutoPASS	49,50	54	0

Tabla A. 3. Tarifas para vehículos de menos de 3,5 tn en Oslo. Fuente: <http://urbanaccessregulations.eu//>

Oslo			
Vehículos con > 3.5t	Euro 6 / PHEV	Euro 5 y más viejo	Eléctrico e hidrógeno
	NOK	NOK	NOK
No hay hora punta	104	166	0
Con AutoPASS	93,60	149,40	0
Hora punta	135	198	0
Con AutoPASS	121,50	178,20	0

Tabla A. 4. Tarifas para vehículos de más de 3,5 tn en Oslo. Fuente: <http://urbanaccessregulations.eu/>

Exenciones: transporte público, vehículos al servicio de la administración, motocicletas, ciclomotores, vehículos eléctricos y de hidrogeno, conductores con movilidad reducida. Los residentes con tarjeta de estacionamiento registrada pueden utilizar las carreteras de peaje alrededor de Oslo, Bergen, Stavanger (Nord-Jaeren), Trondheim, Tonsberg, Namsos y Kristiansand.

Sistema de cobro: mediante transpondedor “TAG” o vía web con tarjeta crédito. El transpondedor se puede adquirir en una estación de servicio su importe es reembolsable.

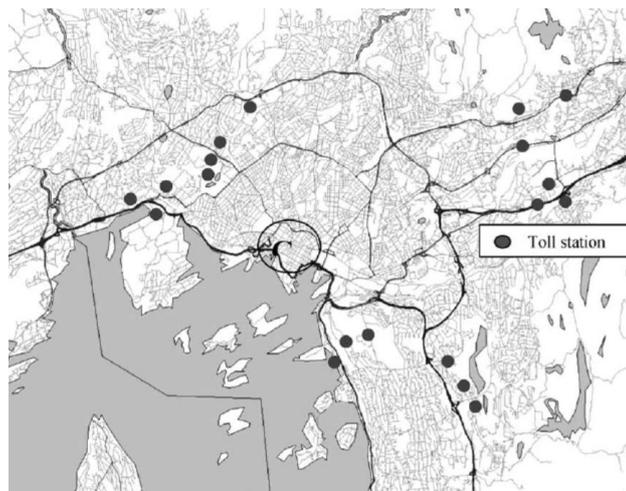


Figura A. 6. Límites y estaciones de peaje en Oslo. Fuente: Farideh Ramjerdi, 2004.

## **A. 7 Stavager (Noruega)**

Población (2017): 132.729 habitantes.

Antecedentes: El anillo de peaje del condado de Stavanger/Sandnes comenzó a funcionar en 2001 con el uso del sistema electrónico de pago de peajes. El esquema fue aprobado por un período de 10 años. Los ingresos del plan contribuyeron a financiar aproximadamente el 41% del coste de un paquete de inversión en carreteras, transporte público y seguridad del tráfico. El coste de ese paquete se estimó en 2.639 millones de coronas noruegas a precios de 2002. El plan consistió en implementar 21 estaciones de peaje ubicadas en las fronteras del condado en todas sus carreteras principales. El horario de funcionamiento del peaje se estableció de lunes a viernes de 6 AM a 6 PM. La tarifa de peaje era más alta entre las 7 y las 10 AM y entre las 2 y 5 PM. Los conductores que utilizaban el sistema de pago de peaje electrónico solo pagaban por sus primeras 75 entradas cada mes y por una sola entrada en un período de una hora. El ingreso bruto anual del peaje en 2002 fue de NOK 95 millones y su costo anual de operación fue de NOK 19.7 millones, aproximadamente el 20,5% de los ingresos (Farideh Ramjerdi et al., 2004).

Objetivos: reducir la contaminación del aire originada por las emisiones de los vehículos automotores y utilizar los fondos recaudados para financiar proyectos de mejora del transporte público.

Tipo de peaje: inicialmente fue un esquema tipo cordón que se pagaba al cruzar el área afectada. Actualmente es una combinación de peaje por congestión y zona de bajas emisiones. El sistema actual de control se realiza mediante cámaras que disponen de un sistema de reconocimiento automático de matrículas ANPR.

Inauguración del sistema: año 2001.

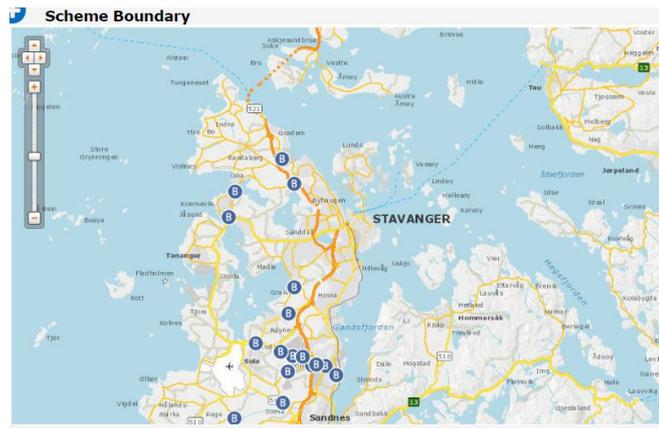
Puntos de control: 17.

Horario de funcionamiento: laborables de 06:00h a 18:00h.

Tarifas: vehículos de menos de 3.5 Tn 20 NOK, vehículos de más de 3.5 Tn 50 NOK. Descuentos con sistema Autopass.

Exenciones: transporte público, vehículos al servicio de la administración, motocicletas, ciclomotores, vehículos eléctricos y de hidrogeno, conductores con movilidad reducida. Los residentes con tarjeta de estacionamiento registrada pueden utilizar las carreteras de peaje alrededor de Oslo, Bergen, Stavanger (Nord-Jaeren), Trondheim, Tonsberg, Namsos y Kristiansand.

Sistema de cobro y control: es necesario un registro inicial del vehículo (sistema Autopass). El sistema está totalmente automatizado y envía una factura electrónica por internet o correo ordinario con el uso realizado del peaje.



**Figura A. 7. Esquema limites peaje. En azul las estaciones de peaje. En naranja la autopista. En amarillo las calles afectadas por la tasa. Fuente: <http://urbanaccessregulations.eu/>**

## **A. 8 Tønsberg (Noruega)**

Población (2014): 41.550 habitantes.

Antecedentes: Tønsberg, planeaba introducir un anillo de peaje en enero de 2004. Una encuesta realizada en 2003 mostró que el 80% de la población en Tønsberg estaba en contra de la introducción del anillo. La oposición al peaje ganó la mayoría en las elecciones locales celebradas en septiembre de 2003, poniendo así en tela de juicio el plan para la introducción de un anillo de peaje (Farideh Ramjerdi et al., 2004). Finalmente, el peaje urbano de Tønsberg fue implementado en el año 2004 (Madslien, A; 2005) como una fuente para financiar un paquete de obra de infraestructuras en la ciudad.

Objetivos: reducir la contaminación del aire originada por las emisiones de los vehículos automotores y utilizar los fondos recaudados para financiar proyectos de mejora del transporte público.

Tipo de peaje: esquema tipo cordón que se paga al cruzar el área afectada. El sistema de control se realiza mediante cámaras que disponen de un sistema de reconocimiento automático de matrículas ANPR.

Inauguración del sistema: año 2004.

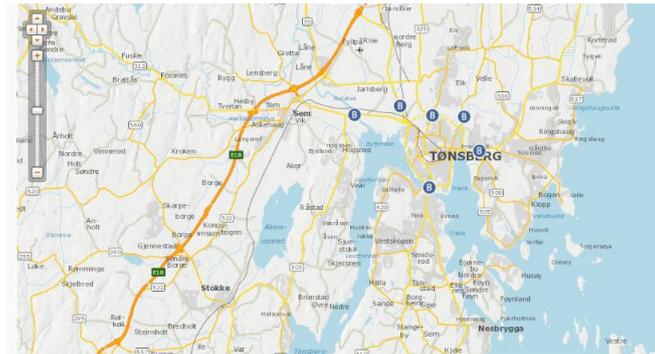
Puntos de control: 6.

Horario de funcionamiento: laborables de 06:00h a 18:00h.

Tarifas: vehículos de menos de 3.5 Tn 15 NOK, vehículos de más de 3.5 Tn 30 NOK. Descuentos con sistema Autopass.

Exenciones: transporte público, vehículos al servicio de la administración, motocicletas, ciclomotores, vehículos eléctricos y de hidrogeno, conductores con movilidad reducida. Los residentes con tarjeta de estacionamiento registrada pueden utilizar las carreteras de peaje alrededor de Oslo, Bergen, Stavanger (Nord-Jaeren), Trondheim, Tønsberg, Namsos y Kristiansand.

Sistema de cobro y control: es necesario un registro inicial del vehículo (sistema Autopass). El sistema está totalmente automatizado y envía una factura electrónica por internet o correo ordinario con el uso realizado del peaje.



**Figura A. 8. Esquema limites peaje. En azul las estaciones de peaje. En naranja la autopista. En amarillo las calles afectadas por la tasa. Fuente: <http://urbanaccessregulations.eu/>**

## **A. 9 Trondheim (Noruega)**

Población (2017): 190.464 habitantes. El 60% viven fuera del ámbito de peaje.

Antecedentes: ausencia de vías orbitales y tráfico de paso por el centro. Fuertes incrementos de tráfico (25% de 1983 a 1987) y congestión extrema. Escasez de recursos financieros. Bergen, 1986, y Oslo, 1990, como precedentes.

Objetivos: financiar la construcción de un cinturón viario alrededor del centro, mejorar el viario interno para peatones y ciclistas y dar prioridad al transporte público durante un período de 14 años que iría entre 1991 y 2005. Del conjunto del paquete de inversiones, el peaje aportó el 60% y el estado el 40%.

Tipo de peaje: tipo cordón.

Proceso institucional: iniciativa municipal. Aprobación por el Parlamento Nacional del plan de transporte y aplicación del peaje para financiar dicho plan.

Fecha de inicio de los trabajos: 1987.

Inauguración del sistema actual: octubre de 1991. Dejó de funcionar en diciembre de 2005.

Superficie del ámbito: 18 Km<sup>2</sup>.

Puntos de control: inicialmente 18 y, posteriormente 23, todos ellos automatizados. Horario de funcionamiento: Laborables: 06:00h-17:00h.

Tarifas: 2 euros por entrada, con un máximo de 60 entradas/mes. Descuento del 10% sobre la tarifa para aquellos vehículos que entran al anillo a partir de las 10:00h.

Exenciones: transporte público, vehículos al servicio de la administración, motocicletas, ciclomotores, vehículos eléctricos y de hidrogeno, conductores con movilidad reducida. Los residentes con tarjeta de estacionamiento registrada pueden utilizar las carreteras de peaje alrededor de Oslo, Bergen, Stavanger (Nord-Jaeren), Trondheim, Tonsberg, Namsos y Kristiansand.

Sistema de cobro y control: mediante transpondedor “TAG” o vía web con tarjeta crédito. El transpondedor se puede adquirir en una estación de servicio su importe es reembolsable.

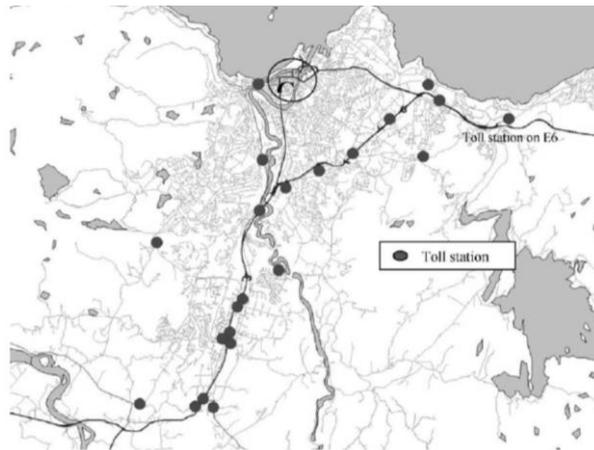


Figura A. 9. Límites y estaciones de peaje en Trondheim. Fuente: Farideh Ramjerdi, 2004

## A. 10 Durham (Reino Unido)

Población (2010): 65.549 habitantes.

Antecedentes: la zona se encuentra en la península de Durham, el hogar del histórico Patrimonio de la Humanidad de la Catedral de Durham y del Castillo, así como del “Market Place Durham”, la escuela corista de Durham, facultades de la Universidad de Durham y una variedad de tiendas y negocios. El peaje por congestión de Durham fue el primero que se introdujo en el Reino Unido en octubre de 2002. El Consejo del Condado de Durham introdujo la tasa para aquellos conductores que usaban la calle “Saddler Street”, ubicada en el centro de la ciudad y con 1.000 años de antigüedad. Esta es la única vía de acceso público que conduce a la Catedral y Castillo de Durham. Hasta 2011 el control de acceso se realizaba mediante un bolardo retráctil. Debido a los altos índices de incidentes se sustituyeron por un sistema de control de acceso mediante cámaras de reconocimiento de matrículas.

Objetivos: la zona de congestión para usuarios de “Saddler Street” tiene como objetivo reducir la congestión y la contaminación del tráfico, y mejorar la calidad del aire, así como preservar el patrimonio histórico en el centro de Durham. También tiene como objetivo fomentar el uso “fuera de horario” del área, creando calles más seguras y atractivas para todos.

Tipo de peaje: tasa por congestión.

Inauguración del sistema: octubre de 2002.

Horario de funcionamiento: lunes-sábado de 10:00h a 16:00h.

Tarifas: tasa diaria de 2 libras.

Exenciones: transporte público, vehículos al servicio de la administración, motocicletas, ciclomotores, vehículos de reparto.

Sistema de cobro y control: el pago se puede realizar en la cabina de peaje o por teléfono. Existen cámaras de reconocimiento de matrículas (APR) que identifican a los vehículos que no han pagado la tasa.



Figura A. 10. Zona regulada del “Durham Charging Zone”. Fuente: <http://roadpricing.blogspot.com/>

## **A. 11 Londres (Reino Unido)**

Población (2016): 8.787.892 habitantes en el Gran Londres y 13.879.757 en el área metropolitana.

Antecedentes: en 1974, el “Greater London Council” realizó un estudio, llamado “Supplementary Licensing”, donde se contempla el establecimiento de un cordón, dentro del “Inner Ring Road”, que implicaría el pago de 5 libras esterlinas a aquellos vehículos que quisieran cruzar por él. Esta tarifa se triplicaría para el acceso a camiones. Se estima que el sistema tendría unos gastos de funcionamiento de aproximadamente el 15% de los ingresos y que produciría un 45% de reducción del tráfico entrante y un incremento de la velocidad de circulación del 40%. En 2001 se presentó el primer “Scheme Order”, forma jurídica del proyecto, que aprobó el alcalde Livingstone en 2002.

Objetivos: los objetivos de la implantación del sistema eran reducir la congestión, mejorar el transporte público en autobús y mejorar su fiabilidad, así como hacer más eficiente la distribución de mercancías y servicios en la ciudad.

Tipo de peaje: peaje zonal anti congestión por acceso a área restringida.

Proceso institucional: iniciativa del “Greater London Council” bajo el liderazgo del alcalde Ken Livingstone con apoyo del Gobierno Laborista inglés.

Fecha de inicio de los trabajos: julio de 2000.

Inauguración del sistema actual: febrero de 2003.

Superficie del ámbito: 22 Km<sup>2</sup>.

Puntos de control: 700 videocámaras en 230 puntos de control.

Horario de funcionamiento: laborables de 7:00h a 18:30h.

Tarifas: dependiendo del método de pago entre 12 €-16 € por día.

Exenciones: discapacitados, servicios de emergencia, fuerzas armadas, motocicletas y vehículos de ultra bajas emisiones que cumplan con la norma euro 5 de contaminación del aire.

Sistema de cobro y control: mediante transpondedor, vía internet, SMS, por teléfono o IVR<sup>111</sup>.

En cuanto al sistema de control, la entrada o circulación de vehículos en la zona se controla mediante cámaras situadas en puntos estratégicos, con reconocimiento automático de matrícula (“Automatic Number Plate Recognition - ANPR”). Una vez leída la matrícula el sistema la compara con los pagos hechos al día. Si el vehículo ha pagado o está exento, el dato no se mantiene más de 24 horas. Pasado ese tiempo los

---

111 IVR” Interactive voice response” es una solución de pago que permite a las personas interactuar con un sistema de pago telefónico automatizado para realizar pagos de ACH, tarjetas de débito y crédito las 24 horas, todos los días.

vehículos que no hayan realizado el pago son multados. La sanción suele ser de unas 100 libras, con un descuento del 50% si se paga en 14 días y un aumento del precio a 150 libras si se paga después de 28 días.

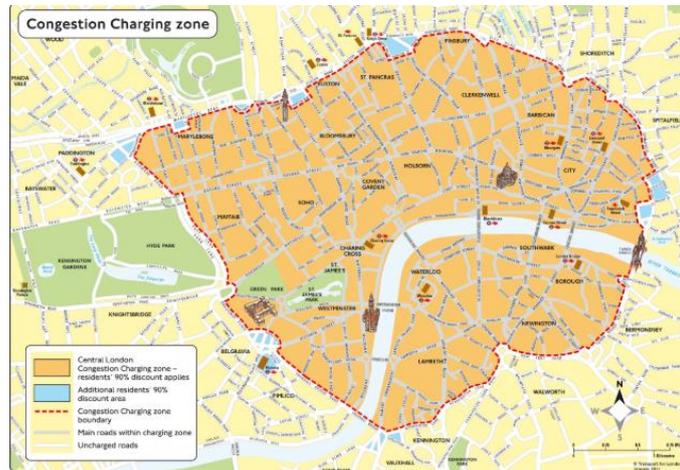


Figura A. 11. Área afectada por el “Congestion Charging” de Londres. Fuente: TfL

## A. 12 Gotemburgo (Noruega)

Población (2017): 590.580 habitantes (949.812 en el área metropolitana).

Antecedentes: en enero de 2013 la ciudad Gotemburgo, segunda ciudad más grande de Suecia, introdujo un esquema de peaje urbano tipo cordón aplicando una tasa por congestión.

Objetivos: reducir la congestión, mejorar la accesibilidad y el medio ambiente, aunque también se pretendía obtener fondos para realizar obras de infraestructuras de baja rentabilidad.

Tipo de peaje: tipo cordón.

Proceso institucional: aprobación por el Ayuntamiento, con apoyo de los principales partidos, y aprobación por el Parlamento Noruego. Referéndum consultivo en 2014 posterior a la introducción de la tasa por congestión.

Superficie del ámbito: unos 25 Km<sup>2</sup> que abarcan esencialmente el centro de la ciudad de Gotemburgo y la carretera principal E8.

Horario de funcionamiento: 6:00h – 18:29h de lunes a viernes. El mes de julio el sistema permanece apagado.

Tarifas: se aplican a todos los vehículos en función de la hora de acceso. La cantidad máxima diaria a pagar es de 60 SEK. Si un vehículo pasa por dos estaciones en una misma hora, sólo paga la estación con mayor tasa.

Time of day	Tax
00:00 – 05:59	0 SEK
06:00 – 06:29	9 SEK
06:30 – 06:59	16 SEK
07:00 – 07:59	22 SEK
08:00 – 08:29	16 SEK
08:30 – 14:59	9 SEK
15:00 – 15:29	16 SEK
15:30 – 16:59	22 SEK
17:00 – 17:59	16 SEK
18:00 – 18:29	9 SEK
18:30 – 23:59	0 SEK

Tabla A. 5. Tarifas del peaje urbano de Gotemburgo. Fuente: <http://urbanaccessregulations.eu/>

Sistema de cobro: sistema automatizado mediante lectura de matrículas. La Agencia de Transporte Sueca envía el comprobante de pago al propietario del vehículo incluso si este es extranjero. Si la tasa no se paga se impone una multa de 500 SEK.

Exenciones: vehículos de emergencia, autobuses con un peso total de al menos 14 tn, vehículos diplomáticos, motocicletas, vehículos militares, vehículos con permiso de estacionamiento para personas con discapacidades, vehículos eléctricos. No existen descuentos para residentes.

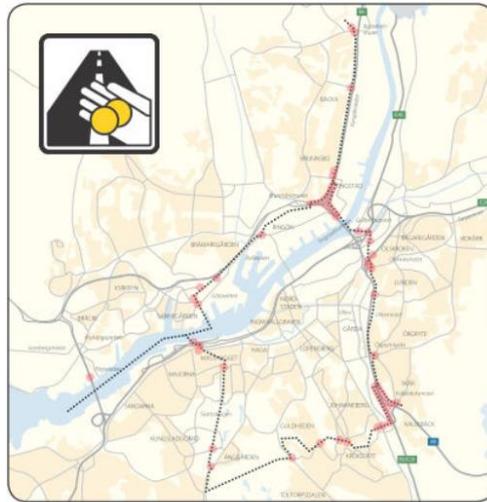


Figura A. 12. Área afectada por el peaje urbano de Gotemburgo. Fuente: <http://urbanaccessregulations.eu/>



Figura A. 13. Una de las entradas de acceso al peaje urbano de Gotemburgo. Fuente: <http://urbanaccessregulations.eu/>

### **A. 13 Estocolmo (Suecia)**

Población (2016): 935.619 habitantes.

Antecedentes: en 1992, un acuerdo entre los partidos socialdemócrata, conservador y liberal, preveía la construcción de un cinturón exterior occidental de autopistas, un anillo oriental y un “toll ring” en Estocolmo. Después de un cambio político en las elecciones de 1994, el gobierno abandonó dicho acuerdo en 1997. Un nuevo acuerdo político, de socialdemócratas y verdes, después de las elecciones del 2002 permitió retomar el “toll ring” como instrumento para reducir la congestión en la ciudad de Estocolmo.

Objetivos: reducir la congestión, mejorar la accesibilidad y el medio ambiente en la ciudad.

Tipo de peaje: peaje zonal anti congestión por acceso a área restringida.

Proceso institucional: acuerdo municipal entre socialdemócratas y verdes. Apoyo de la Dirección General de Carreteras del Estado encargada de gestionar el sistema. Referéndum positivo para su implantación el 17 de septiembre de 2006.

Fecha de inicio de los trabajos: 2002.

Inauguración del sistema: enero de 2006.

Superficie del ámbito: unos 50 Km<sup>2</sup>.

Puntos de control: 18.

Horario de funcionamiento: laborables de 06:30h a 18:30h.

Tarifas: por entrada al cordón con un importe entre 1,15 € y 3,6 € al día con un máximo de 11 €/día.

Exenciones: autobuses, taxis, motocicletas y vehículos con combustibles alternativos. Sin condiciones especiales para los residentes.

Sistema de cobro y control: es necesario un registro inicial del vehículo. El sistema está totalmente automatizado y envía una factura electrónica por internet o correo ordinario con el uso realizado del peaje.



Figura A. 14. Área afectada por el peaje urbano de Estocolmo. Fuente: <http://urbanaccessregulations.eu/>



Figura A. 15. Punto de control del peaje urbano de Estocolmo.

#### **A. 14 Milán (Italia)**

Población (2017): 1,3 millones de habitantes.

Antecedentes: la alta dependencia del uso del automóvil para viajar en Milán junto con unas condiciones geoclimáticas adversas de la región de Padania hacen que se produzcan unos altos niveles de contaminación. Durante el período 2002-2007, el límite de concentración de PM<sub>10</sub> establecido por la normativa ambiental de la UE se excedió durante 125 días, según la “Agenzia Milanese Mobilità Ambiente” en adelante AMMA, con un promedio de 51.2 lg/m<sup>3</sup>. En 2008, el Ayuntamiento de la ciudad de Milán decide presentar un paquete de políticas de transporte que incluyen la implementación del Ecopass. El 16 de enero de 2012 el sistema Ecopass es sustituido por un nuevo esquema denominado Área C. El nuevo esquema cubre la misma área, pero cambia el concepto de tarifa por contaminación por el esquema tradicional de tarifa por congestión.

Objetivos: reducir la contaminación del aire originada por las emisiones de los vehículos automotores y utilizar los fondos recaudados para financiar proyectos de mejora del transporte público.

Tipo de peaje: peaje zonal anti congestión por acceso a área restringida.

Inauguración del sistema: 2 enero de 2008.

Superficie del ámbito: unos 8 Km<sup>2</sup>.

Puntos de control: 43.

Horario de funcionamiento: laborables de 07:30h a 19:30h.

Tarifas: por entrada al cordón con un importe entre 2 € y 10 €.

Exenciones: autobuses, taxis, motocicletas y vehículos con combustibles alternativos. Residentes si utilizan vehículos con motor de bajas emisiones.

Sistema de cobro y control: es necesario un registro inicial del vehículo. El sistema está totalmente automatizado y envía una factura electrónica por internet o correo ordinario con el uso realizado del peaje.

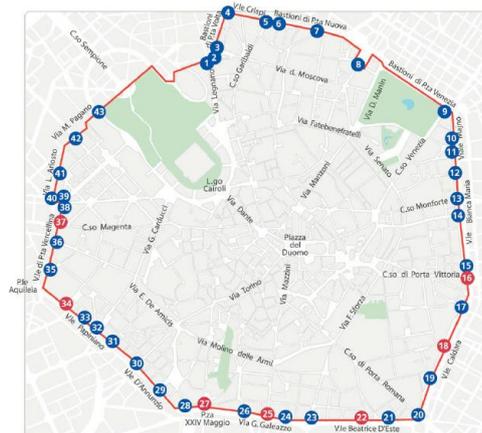


Figura A. 16. Área de congestión de Milán y puntos de control. Fuente: Rotaris, 2010.

Toll classes	Definition
Class I	Liquid propane gas-methane-electric-hybrid
Class II	Gasoline Euro III, IV or more recent Diesel Euro IV without anti-particulate filter (up to 30/06/08) Cars and freight vehicles diesel Euro IV or more recent with anti-particulate filter
Class III	Gasoline Euro I and II
Class IV	Gasoline Euro 0 Diesel cars Euro I-III Diesel goods vehicles Euro III Diesel buses Euro IV and V
Class V	Diesel cars Euro 0 Goods vehicles Euro 0-II Diesel buses Euro 0-III

Tabla A. 6. Clases de tarifas basadas en las emisiones de la normativa Euro. Fuente: Rotaris, 2010

Ecopass tariffs for cars.

Toll classes	Daily charge	Discounted multiple entries (max 100 entries per year)		Yearly pass for residents
		50% Rebate (first 50 entries)	40% Rebate (successive 50 entries)	
Class I			Free	
Class II			Free	
Class III	€ 2	€ 50	€ 60	€ 50
Class IV	€ 5	€ 125	€ 150	€ 125
Class V	€ 10	€ 250	€ 300	€ 250

Tabla A. 7. Tarifas Ecopass para vehículos. Fuente: Rotaris, 2010.

Cars	Cars			Freight vehicles		
	Before Ecopass scheme	After Ecopass scheme March 2008	Variation	Before Ecopass scheme	After Ecopass scheme March 2008	Variation
Class I	1105	1918	813	92	410	317
Class II	50,993	53,088	2095	3399	4043	644
Class III	11,898	5960	-5939	356	494	138
Class IV	20,992	7535	-13,457	6653	3917	-2737
Class V	0	0	0	2674	1638	-1036
Total	84,988	68,500	-16,488	13,174	10,500	-2674

Tabla A. 8. Composición del tráfico por tipos de tarifas (vehículos/día, marzo 2008). Fuente: Rotaris, 2010.

## A. 15 Palermo (Italia)

Población (2016): 674.435 habitantes.

Objetivos: restringir el acceso de vehículos al centro de la ciudad para reducir el tráfico y la contaminación del aire.

Tipo de peaje: peaje zonal anti congestión por acceso a área restringida.

Inauguración del sistema: 10 octubre de 2016.

Superficie del ámbito: unos 3 Km<sup>2</sup>.

Horario de funcionamiento: laborables de 08:00h a 20:00h.

Tarifas: para poder acceder a la zona se necesita autorización previa, tras comprobar que el vehículo cumple con las normas europeas anticontaminación.

	Daily	Monthly	Six-monthly	Annual
Residents* with less polluting vehicles (meeting petrol Euro standard 3 and diesel Euro 4)	5€	20€	50€	80€
Residents* with more polluting vehicles ( <b>not</b> meeting petrol Euro standard 3 and diesel Euro 4)	5€	20€	50€	90€
Low emission vehicles (hybrid, gas including bi-fuel)	2.50€	10€	25€	50€
Non-residents	5€	20€	50€	100€
Buses (tourist, school)	30€	120€	300€	600€

Tabla A. 9. Tarifas de la zona de tráfico limitada de Palermo. Fuente: <http://urbanaccessregulations.eu/>

Exenciones: vehículos de la armada, policía, bomberos, ambulancias, transporte público, coches compartidos, vehículos de servicios, taxis, motocicletas y vehículos con combustibles alternativos.

Sistema de cobro y control: es necesario un registro inicial del vehículo. El sistema está totalmente automatizado y envía una factura electrónica por internet o correo ordinario con el uso realizado del peaje.



Figura A. 17. Señalización de acceso a la zona de tráfico restringido de Palermo. Fuente: <http://urbanaccessregulations.eu/>



Figura A. 18. Área afectada por la zona de acceso restringido de Palermo. Fuente: <http://urbanaccessregulations.eu/>

## **A. 16 Roma (Italia)**

Población (2017): 2,8 millones de habitantes.

Antecedentes: en 1989, se establece una zona de tráfico limitado muy reducida en la que sólo se permite el acceso a residentes o vehículos autorizados pero la vigilancia es escasa y la tasa de infracción elevada.

Objetivos: reducir la congestión y mejorar la calidad ambiental en el centro histórico.

Tipo de peaje: peaje zonal anticongestión por acceso a área restringida.

Proceso institucional: decisión del Ayuntamiento de Roma.

Fecha de inicio de los trabajos: 1987.

Inauguración del sistema actual: en 1998 se establece el pago de una tarifa para el acceso a Il centro histórico. En 2001 se automatiza es sistema de acceso.

Superficie del ámbito: hay tres recintos de peaje independientes: La zona de tráfico limitado del centro Histórico, con unos 5,5 km<sup>2</sup> de extensión, establecida en 1989. La zona de tráfico limitado de San Lorenzo, establecida en 2003, con 2,5 km<sup>2</sup> de superficie aproximada. La zona de tráfico limitado del Trastevere, establecida en mayo de 2004, con 0,8 Km<sup>2</sup>.

Puntos de control: 22 puntos de control con cámaras en el centro histórico. La zona del Trastevere funciona autónomamente con control convencional.

Horario de funcionamiento: de lunes a viernes de 6.30h a 18.00h.

Tarifas: hasta 340 euros anuales. Existen diversos tipos de permisos: cruzar, circular, etc. Exenciones o descuentos para residentes, discapacitados, motocicletas, artesanos, talleres de reparación de automóviles, locales empresariales y vehículos de reparto de mercancía.

Sistema de cobro y control: normalmente, se realiza un solo pago anual. Existen permisos semanales y diarios. Inicialmente identificación con pegativa visible en el parabrisas y vidrio posterior del vehículo. Con la automatización del sistema se puede disponer gratuitamente de un dispositivo interno “smart card”, que es detectada en las puertas de acceso. En caso de ausencia de permiso, las cámaras fotografían las placas de matrículas.

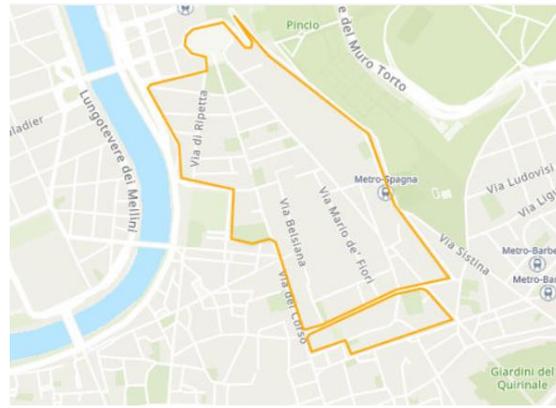


Figura A. 19. Zona del Trastevere en Roma afectada por la ZTL. Fuente: <http://urbanaccessregulations.eu/>



Figura A. 20. Punto de acceso a la zona de tráfico limitado (ZTL) en Roma

### **A. 17 Valetta (Italia)**

Población (2017): 1,3 millones de habitantes.

Antecedentes: el sistema de acceso controlado de vehículos de Valetta (Malta), denominado CVA (Controlled Vehicular Access), se introdujo el 1 de mayo de 2007. El acceso de los vehículos a la zona delimitada se controla cámaras capaces de leer las matrículas de los vehículos que acceden cuyo sistema permita calcular el tiempo de permanencia de los vehículos en al área afectada por el peaje.

Objetivos: aumentar la accesibilidad, incentivar un mejor uso de las plazas de aparcamiento, reducir la contaminación del aire originada por las emisiones de los vehículos automotores.

Tipo de peaje: peaje zonal anti congestión por acceso a área restringida.

Superficie del ámbito: unos 0,8 Km<sup>2</sup>.

Horario de funcionamiento: laborables de 8:00h a 18:00h.

Tarifas: por entrada al cordón con un importe entre 2 € y 10 €.

TIEMPO	TASA
Acceso los primeros 30 minutos	Gratuito
Acceso después de 30 minutos y hasta 60 minutos	0,82 €
Acceso después de 60 minutos	0.82 €/hora con una tasa máxima de 6,62 €
Días festivos	Gratuito
Sábados y Domingo	Gratuito

Exenciones: autobuses, taxis, motocicletas y vehículos con combustibles alternativos. Residentes si utilizan vehículos con motor de bajas emisiones.

Sistema de cobro y control: es necesario un registro inicial del vehículo. El sistema está totalmente automatizado y envía una factura electrónica por internet o correo ordinario con el uso realizado del peaje.



Figura A. 21. Área del CVA en Valletta. <http://urbanaccessregulations.eu/>

## **ANEJO B. Características básicas de la movilidad en día laborable en Barcelona**

### **B. 1 La movilidad en Barcelona**

El presente trabajo se ha desarrollado con los datos de movilidad disponibles del Ayuntamiento de Barcelona obtenidos a partir de trabajos desarrollados junto con otras entidades públicas como:

- ATM (Autoritat del Transport Metropolita de Barcelona)
- AMB (Àrea Metropolitana de Barcelona)
- AMTU (Associació de municipis per la Mobilitat i el Transport Urbà)
- Generalitat de Catalunya (Institut d'Estadística de Catalunya)

Uno de estos trabajos ha sido la encuesta de movilidad en día laborable en Barcelona (EMEF 2016) que es una estadística de periodicidad anual promovida por la Autoridad de Transporte Metropolitano de Barcelona (ATM) y el Instituto de Estadística de Cataluña. Se inicio en el año 2003 y desde el año 2014 es la estadística oficial. El objetivo del informe es conocer las características básicas de la movilidad en día laborable (de lunes a viernes no festivo) de la población residente en el ámbito territorial del Sistema Tarifario Integrado (STI)<sup>112</sup> de 16 años en adelante. Los datos de movilidad utilizados en el presente trabajo han sido los del año 2016.

La información recogida hace referencia a los desplazamientos realizados el último día laborable antes de realizar la encuesta.

- 4.713.222 personas residentes en el ámbito del sistema tarifario integral (STI).
- 16.047.237 desplazamientos en día laborable.
- 3,4 desplazamientos/persona en día laborable.

Un desplazamiento corresponde con un único motivo y puede tener una o más etapas llevadas a cabo con modos de transporte diferentes. Una etapa es cada uno de los trayectos que se llevan a cabo en un desplazamiento, cuando estos se hacen cambiando diferentes modos de transporte.

- a) Población sin movilidad (9,5%). 449.929 personas. Cero desplazamientos. Este grupo incluye las personas que no hicieron ningún desplazamiento durante el día anterior a la encuesta.
- b) Población con movilidad (90.5%). 4.263.293 personas. 16.047.237 desplazamientos. 17.738.900 etapas.
- c) Población con 8 o más desplazamientos laborables diarios (1.5%). 63.256 personas. 889.155 desplazamientos *in labore*. Este grupo comprende la población para la cual la acción de desplazarse

---

<sup>112</sup> El ámbito del sistema tarifario integrado de la Autoritat del Transport Metropolità comprende un total de 253 municipios, divididos en seis coronas y diferentes sectores tarifarios. Un solo título permite utilizar los medios de transporte necesarios para desplazarse de un punto a otro. Permiten hacer transbordo en la red integrada de cercanías de Barcelona, de los Ferrocarrils de la Generalitat, del metro, del autobús y del tranvía.

es un elemento clave de su trabajo: transportistas, mensajeros, comerciales, técnicos, taxistas, servicios de urgencias y emergencias, etc.

### Marco de referencia

La ciudad de Barcelona tiene una superficie de 96,6 km<sup>2</sup>. La superficie de suelo urbano (42,4 km<sup>2</sup>) representa el 43% del total de la ciudad. La población de Barcelona a 1 de enero de 2016 creció ligeramente respecto del año 2015.

BARCELONA	2016	FONT D'INFORMACIÓ
Superfície (km <sup>2</sup> )	98,6	Idescat
Superfície sòl urbà* (km <sup>2</sup> )	42,4	IERMB a partir de Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya (2009), CREAF
Densitat total (hab/km <sup>2</sup> )	16.315,9	Idescat
Densitat per sòl urbà (hab/km <sup>2</sup> )	37.912,6	IERMB a partir de Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya (2009), CREAF

\*Suelo urbano: casas aisladas, centro urbano, colonias y núcleo aislados, ensanche, viviendas unifamiliares, urbanizaciones.

INFORMACIÓ BÀSICA DEMOGRÀFICA I SOCIAL	2015		2016		Diferències 2016-2015		FONT D'INFORMACIÓ
	Absolutes	Relatives	Absolutes	Relatives	Absolutes	Relatives	
Població							
<b>Sistema Tarifari Integrat</b>	<b>5.628.132</b>	<b>100,0%</b>	<b>5.647.014</b>	<b>100,0%</b>	18.882	0,3%	Idescat. Padró continu
Barcelona	1.604.555	28,5%	1.608.746	28,5%	4.191	0,3%	
Resta 1a Corona STI	1.221.629	21,7%	1.228.179	21,7%	6.550	0,5%	
<b>Total 1a Corona STI</b>	<b>2.826.184</b>	<b>50,2%</b>	<b>2.836.925</b>	<b>50,2%</b>	<b>10.741</b>	<b>0,4%</b>	
Resta AMB	387.591	6,9%	389.675	6,9%	2.084	0,5%	
<b>Total AMB</b>	<b>3.213.775</b>	<b>57,1%</b>	<b>3.226.600</b>	<b>57,1%</b>	<b>12.825</b>	<b>0,4%</b>	
Resta RMB	1.814.483	32,2%	1.820.143	32,2%	5.660	0,3%	
<b>Total RMB</b>	<b>5.028.258</b>	<b>89,3%</b>	<b>5.046.743</b>	<b>89,3%</b>	<b>18.485</b>	<b>0,4%</b>	
Resta STI	599.874	10,7%	600.271	10,7%	397	0,1%	
Creixement població 2003-2016	-	-	-	-	26.008	1,6%	
Població nascuda a l'estranger	353.246	22,0%	361.590	22,5%	8.344	2,4%	INE
Taxa d'atur							
Província Barcelona	18,2%		14,7%		-2,4		INE. Encuesta de Población Activa
Barcelona	13,9%		11,5%		-1,7		Ajuntament de Barcelona

### Características básicas de la movilidad en Barcelona

La ciudad de Barcelona recibe y/o emite cada día 6,1 millones de desplazamientos de las personas residentes en Sistema de Transporte Integrado (STI). Un 68,7% de estos desplazamientos son internos en la ciudad (4,2 millones) y el 31% (1,91 millones) son de conexión. Casi la totalidad de los flujos internos (origen y destino Barcelona) son realizados por los residentes de la ciudad (95,5%). En los flujos de conexión, son las personas residentes en el resto del STI las que hacen la mayoría de estos desplazamientos (70.9%), mientras que los barceloneses hacen el 29,1% restante.

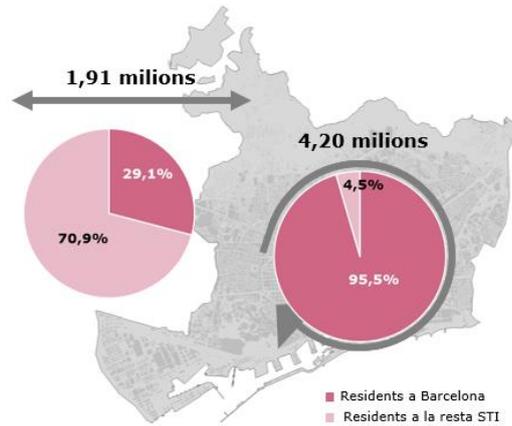


Figura B. 1. Esquema de desplazamientos en el Sistema de Transporte Integral de Barcelona (STI). Fuente: EMEF 2016

	Tipus de flux						Total	%
	BCN-BCN	BCN-Resta Primera Corona STI	BCN-Resta AMB	BCN-Resta RMB	BCN-Fora RMB	BCN-Fora STI		
Residents a Barcelona	4.011.986	309.227	69.660	127.153	11.615	38.791	4.568.433	74,8%
Residents a la resta STI	188.433	719.237	150.987	428.248	53.131	1.915	1.541.950	25,2%
<b>Total</b>	<b>4.200.419</b>	<b>1.028.464</b>	<b>220.648</b>	<b>555.400</b>	<b>64.745</b>	<b>40.706</b>	<b>6.110.382</b>	<b>100,0%</b>

Figura B. 2. Tipos de flujos de desplazamientos dentro del STI. Fuente: EMEF 2016.

La movilidad personal es mayoritaria en los desplazamientos a Barcelona. Así, el 50,6% del total (3,4 millones de desplazamientos) son por motivos personales y sus respectivas vueltas a casa: mientras que el 44% restante son por motivos ocupacionales y las respectivas vueltas a casa (2,7 millones de desplazamientos).

Los principales motivos de desplazamientos en Barcelona son: ida y vuelta al trabajo, ir a comprar, ocio y tiempo libre. Los desplazamientos relacionados con la carga familiar (compras y acompañamiento de personas) representan el 41,2% de la movilidad personal.

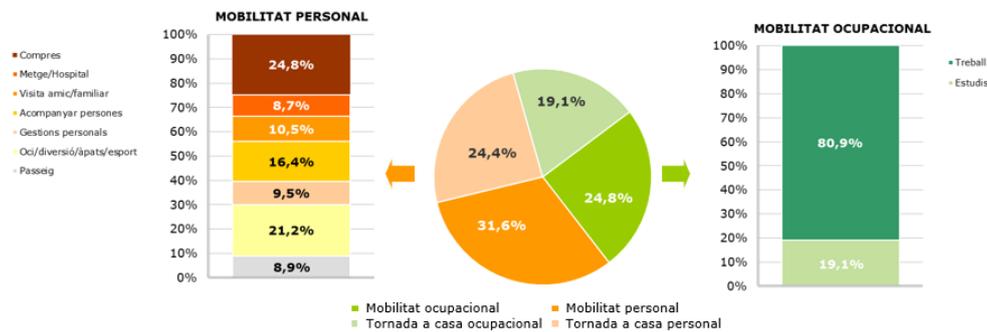


Tabla B. 1. Movilidad personal y ocupacional en Barcelona. Fuente: EMEF 2016.

Los desplazamientos por motivos personales son mayoritarios en la movilidad interna de Barcelona, y representan el 65,5% del total. En los flujos de conexión, por el contrario, son los desplazamientos por motivos ocupacionales los que tienen un mayor peso: representan casi el 64,8% de la movilidad total.

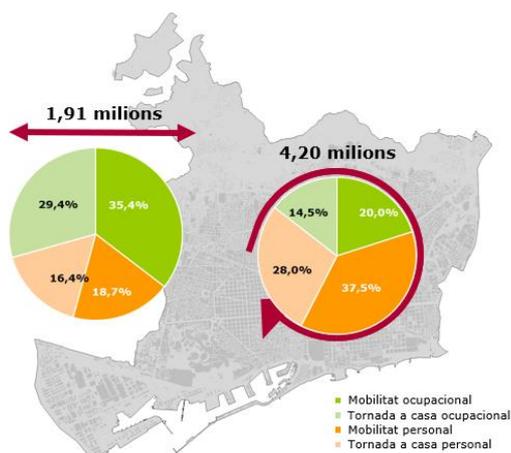


Figura B. 3. Motivos de desplazamientos internos y de conexión en el STI. Fuente: EMEF 2016.

En un día laborable, los desplazamientos con origen y destino Barcelona por motivos personales (idas) son los más importantes, con 1,57 millones de desplazamientos que representan el 25,7% del total. En los desplazamientos de conexión con Barcelona, la movilidad personal pierde importancia, siendo la movilidad ocupacional la que tiene un mayor peso, sobre el 20,3% en todos los casos.

Motiu de desplaçament	INTERNS				CONNEXIÓ								TOTAL	
	BCN-BCN		BCN-Resta Primera Corona STI (i viceversa)		BCN-Resta AMB (i viceversa)		BCN-Resta RMB (i viceversa)		BCN-Resta STI (i viceversa)		BCN-Fora STI (i viceversa)			
	Despl.	%	Despl.	%	Despl.	%	Despl.	%	Despl.	%	Despl.	%	Despl.	%
Mobilitat ocupacional	841.401	20,0%	351.416	34,2%	89.265	40,5%	202.092	36,4%	24.507	37,9%	..	..	1.518.342	24,8%
Mobilitat personal	1.574.322	37,5%	212.880	20,7%	32.914	14,9%	96.911	17,4%	10.506	16,2%	..	..	1.932.226	31,6%
Tornada a casa ocupacional	607.201	14,5%	290.216	28,2%	72.469	32,8%	168.474	30,3%	20.287	31,3%	..	..	1.168.358	19,1%
Tornada a casa personal	1.177.495	28,0%	173.952	16,9%	26.000	11,8%	87.924	15,8%	9.446	14,6%	16.641	40,9%	1.491.457	24,4%
<b>Total</b>	<b>4.200.419</b>	<b>100,0%</b>	<b>1.028.464</b>	<b>100,0%</b>	<b>220.648</b>	<b>100,0%</b>	<b>555.400</b>	<b>100,0%</b>	<b>64.745</b>	<b>100,0%</b>	<b>40.706</b>	<b>100,0%</b>	<b>6.110.382</b>	<b>100,0%</b>

Tabla B. 2. Motivos de desplazamientos internos y de conexión en el STI. Fuente: EMEF 2016.

### Modos de transporte utilizados en el STI

Casi el 74,7% de los desplazamientos con origen y/o destino Barcelona, realizados en día laborable por las personas residentes en el STI, se hacen con modos de transporte sostenibles: el 36,8% a pie y en bicicleta y el 37,9% en transporte público. La cuota modal del transporte privado es del 25,3%. En concreto destacan los desplazamientos caminando y en metro, que conjuntamente representan el 49,8% de los flujos totales.

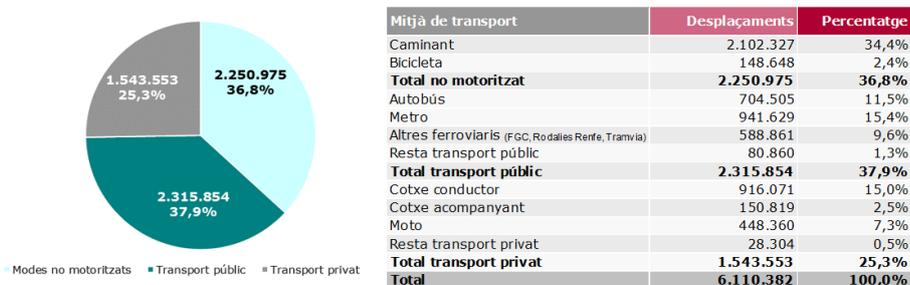


Tabla B. 3. Número de desplazamientos en función del modo de transporte. Fuente: EMEF 2016.

Según el tipo de desplazamiento, el reparto modal presenta diferencias:

- a) Movilidad interna: los modos no motorizados y el transporte público son los más utilizados para desplazarse en día laborable por el interior de Barcelona. Engloban el 85% de los desplazamientos internos.
- b) Movilidad de conexión: los modos de transporte motorizados son utilizados en casi todas las conexiones con Barcelona (96,6%): un 49,8% en transporte público y un 46,8% en transporte privado.

En las relaciones conectivas (Barcelona-áreas limítrofes) se dan importantes diferencias en el uso de los medios motorizados:

- El transporte público asume la mayor cuota en las conexiones establecidas entre Barcelona y el resto de la primera corona.
- El transporte privado aumenta su cuota modal, en términos generales, a medida que aumenta la distancia con Barcelona, asumiendo su máximo con las conexiones entre Barcelona y el resto del STI. Es importante, también, en los flujos con los municipios del resto del área metropolitana de Barcelona.

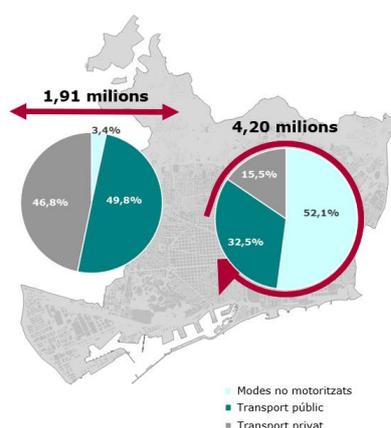


Figura B. 4. Modos de transporte utilizados en el STI. Fuente: EMEF 2016.

Mode de transport	INTERNOS				CONNEXIÓ								TOTAL	
	BCN-BCN		BCN-Resta Primera Corona STI (i viceversa)		BCN-Resta AMB (i viceversa)		BCN-Resta RMB (i viceversa)		BCN-Resta STI (i viceversa)		BCN-Fora STI (i viceversa)		Despl.	%
	Despl.	%	Despl.	%	Despl.	%	Despl.	%	Despl.	%	Despl.	%		
Modes no motoritzats	2.186.527	52,1%	54.528	5,3%	..	..	..	..	..	..	..	..	2.250.975	36,8%
Transport públic	1.364.550	32,5%	542.064	52,7%	101.108	45,8%	259.914	46,8%	28.819	44,5%	19.398	47,7%	2.315.854	37,9%
Transport privat	649.342	15,5%	431.872	42,0%	116.837	53,0%	290.793	52,4%	35.926	55,5%	18.783	46,1%	1.543.553	25,3%
<b>Total</b>	<b>4.200.419</b>	<b>100,0%</b>	<b>1.028.464</b>	<b>100,0%</b>	<b>220.648</b>	<b>100,0%</b>	<b>555.400</b>	<b>100,0%</b>	<b>64.745</b>	<b>100,0%</b>	<b>40.706</b>	<b>100,0%</b>	<b>6.110.382</b>	<b>100,0%</b>

Tabla B. 4. Modos de transporte según el tipo de movilidad. Fuente: EMEF 2016.

### Particularidades de la movilidad en transporte privado en Barcelona

La ocupación media declarada del coche es mayor en los flujos de conexión de Barcelona y fuera de la Región Metropolitana de Barcelona (RMB).

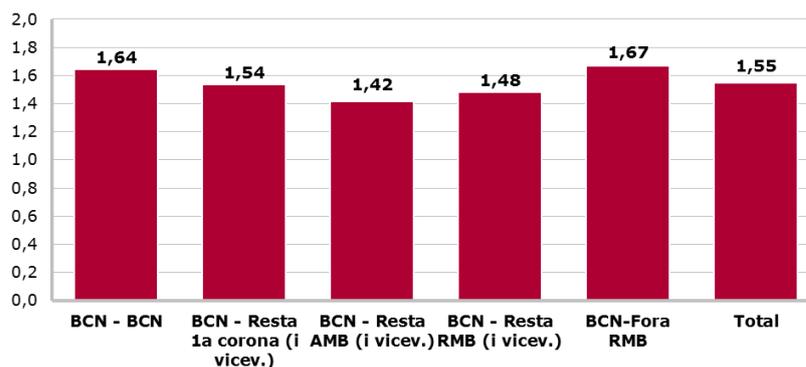


Figura B. 5. Ocupación media declarada del coche. Fuente: EMEF 2016.

La ocupación media declarada de la moto en Barcelona es de 1,1 personas. No se dan variaciones en función del tipo de recorrido del desplazamiento.

A continuación, se analizan las características básicas del parque de vehículos circulante que realizan los flujos, en relación a su combustible y su antigüedad:

- a) Combustibles utilizados: sólo en los desplazamientos internos en Barcelona ciudad es donde el uso de la gasolina supera al gasoil. En todos los flujos los coches a gasoil predominan a los de gasolina. La proporción de coches diésel es mayor en las relaciones entre Barcelona y fuera del área metropolitana de Barcelona.
- b) Antigüedad del parque de vehículos: las diferencias en la antigüedad del parque de vehículos, coches y motos, según los flujos no responde a una lógica territorial.

#### Motivos de desplazamientos y modos de transporte en Barcelona

La relación entre el motivo de desplazamiento y el modo de transporte en la movilidad diaria de Barcelona muestra como:

- a) En los desplazamientos por motivos de trabajo y estudios, el uso de los modos motorizados es mayoritario; en concreto, el 47,9% se hacen en transporte público, y el 34,2% en transporte privado.
- b) En cambio, los desplazamientos por motivos personales se hacen principalmente caminando y en bicicleta (52%), de acuerdo con su carácter de proximidad.

Mode de transport		Motiu de desplaçament				Total
		Mobilitat ocupacional	Mobilitat personal	Tornada a casa ocupacional	Tornada a casa personal	
Desplaçaments	Modes no motoritzats	271.890	1.005.441	209.438	764.206	2.250.975
	Transport públic	727.154	567.981	566.828	453.891	2.315.854
	Transport privat	519.297	358.804	392.091	273.361	1.543.553
	<b>Total</b>	<b>1.518.342</b>	<b>1.932.226</b>	<b>1.168.358</b>	<b>1.491.457</b>	<b>6.110.382</b>
% columna	Modes no motoritzats	17,9%	52,0%	17,9%	51,2%	36,8%
	Transport públic	47,9%	29,4%	48,5%	30,4%	37,9%
	Transport privat	34,2%	18,6%	33,6%	18,3%	25,3%
	<b>Total</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>
% fila	Modes no motoritzats	12,1%	44,7%	9,3%	33,9%	100,0%
	Transport públic	31,4%	24,5%	24,5%	19,6%	100,0%
	Transport privat	33,6%	23,2%	25,4%	17,7%	100,0%
	<b>Total</b>	<b>24,8%</b>	<b>31,6%</b>	<b>19,1%</b>	<b>24,4%</b>	<b>100,0%</b>

Tabla B. 5. Modo de transporte y motivo de desplazamiento. Fuente: EMEF 2016.

## B. 2 La movilidad de las personas residentes en Barcelona

### Características básicas de la movilidad de las personas residentes en Barcelona

Las personas residentes en Barcelona en un día laborable realizan 4,94 millones de desplazamientos, el equivalente a 3,5 desplazamientos por persona y día. Si se excluye la población con 8 o más desplazamientos laborables diarios (comerciales, taxistas, transportistas, etc.) se hacen 4,62 millones, equivalente a 3,3 desplazamientos persona y día.

La población con 8 o más desplazamientos laborables diarios, que representa el 1,1% del total de la población, realizan 326.187 desplazamientos *in labore*, con un promedio diario de 14,3 desplazamientos por persona y día<sup>113</sup>.

Sin considerar la población no móvil (un 8,5% sobre el global) la media de desplazamientos se eleva a 3,6 desplazamientos por persona y día.

	Població 16 anys i més		Desplaçaments		Mitjana
	Absoluts	%	Absoluts	%	
Població general amb mobilitat	1.275.024	91,5%	4.616.241	100,0%	3,6
Població general sense mobilitat	118.034	8,5%	-	-	-
<b>Total població general</b>	<b>1.393.058</b>	<b>100,0%</b>	<b>4.616.241</b>	<b>93,4%</b>	<b>3,3</b>
Població amb 8 o més despl. laborals	22.763	1,1%	326.187	6,6%	14,3
<b>Total Barcelona</b>	<b>1.393.058</b>	<b>100,0%</b>	<b>4.942.429</b>	<b>100,0%</b>	<b>3,5</b>

Tabla B. 6. Desplazamientos diarios de los residentes en Barcelona. Fuente: EMEF 2016.

### Perfiles de la movilidad

La media de desplazamientos diarios entre los hombres llega a los 3,4 desplazamientos diarios por persona y día, mientras que entre las mujeres es de 3,3 desplazamientos por persona y día. La proporción de persona no móvil entre las mujeres es mayor que entre los hombres.

<sup>113</sup> Nota: se tiene que ser prudente a la hora de leer los resultados de los desplazamientos de los profesionales, ya que a menudo estos profesionales no recuerdan con exactitud el número de desplazamientos y sus características, pudiendo desvirtuar la muestra.

	Població 16 anys i més		Desplaçaments		Mitjana
	Absoluts	%	Absoluts	%	
Homes	649.414	46,6%	2.180.471	47,2%	3,4
Dones	743.644	53,4%	2.435.771	52,8%	3,3
<b>Total</b>	<b>1.393.058</b>	<b>100,0%</b>	<b>4.616.241</b>	<b>100,0%</b>	<b>3,3</b>

<b>Homes</b>	<b>3,4 desplaçaments/dia</b>
<b>Dones</b>	<b>3,3 desplaçaments/dia</b>

Tabla B. 7. Perfiles de movilidad entre los residentes en Barcelona. Fuente EMEF 2016.

### Movilidad de las personas residentes en Barcelona según tipo de recorrido

Los desplazamientos realizados por las personas residentes en Barcelona se pueden clasificar, según el origen y el destino en:

- Desplazamientos internos: origen y destino en la ciudad de Barcelona.
- Desplazamientos de conexión: origen Barcelona y destino fuera de este ámbito, y viceversa.
- Desplazamientos externos: realizados por residentes en Barcelona con origen y destino fuera de la ciudad.

En un día laborable la población de Barcelona de 16 años y más hace 4.616.241 desplazamientos: un 86,9% son internos, el 12,1% de conexión, y el 1% restante son desplazamientos realizados con origen y destino fuera de la ciudad de Barcelona. Tanto los hombres como las mujeres en un día laborable hacen más desplazamientos internos en Barcelona que de conexión.

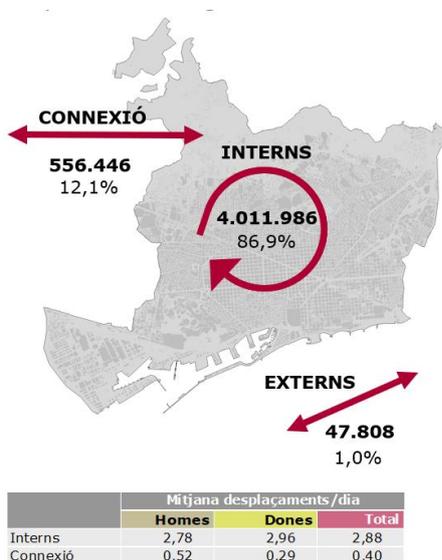


Tabla B. 8. Media de desplazamiento/día de los residentes en Barcelona. Fuente EMEF 2016.

### Motivo de los desplazamientos de los residentes en Barcelona

De los 4,61 millones de desplazamientos diarios de los residentes en Barcelona, 62,2% se hacen por motivos personales, mientras que el 37,8% restante se hacen por motivos ocupacionales (incluyendo las vueltas a

casa por estos motivos). En la movilidad por motivos personales destacan los desplazamientos para ir de compras (27,1%), seguido en menor proporción de los desplazamientos de ocio y tiempo libre (20%). Los desplazamientos relacionados con la carga familiar (compras y acompañamiento de personas) representan el 43,7% de la movilidad personal total. En la movilidad ocupacional predominan los desplazamientos por trabajo (81%).

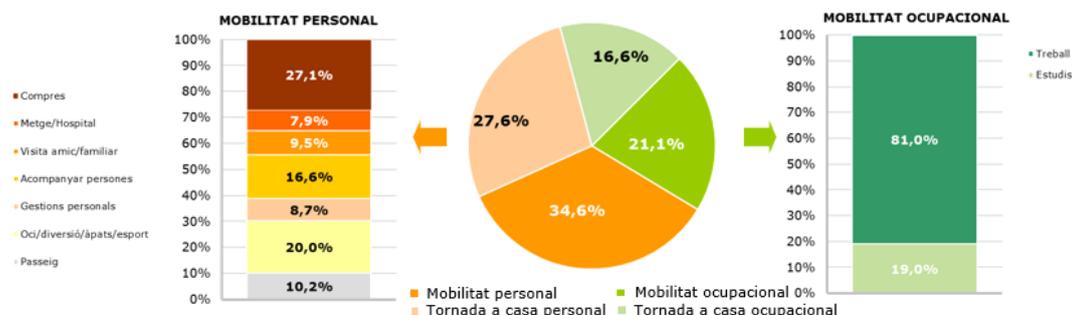


Figura B. 6. Motivo de los desplazamientos de los residentes en Barcelona. Fuente: EMEF 2016.

La distribución de los desplazamientos en día laborable según el motivo y el sexo, muestra:

- Los hombres hacen, proporcionalmente, más desplazamientos para trabajar y estudiar que las mujeres.
- Las mujeres se desplazan más motivos relacionados con la carga familiar (compras y acompañar a personas): 18,2% del total. En el caso de los hombres, la proporción de esta movilidad representa el 11,8% del total.

Motiu de desplaçament	Homes		Dones		Total	
	Despl.	%	Despl.	%	Despl.	%
Treball	416.184	19,1%	374.478	15,4%	790.661	17,1%
Estudis	89.643	4,1%	95.983	3,9%	185.627	4,0%
<b>Mobilitat ocupacional</b>	<b>505.827</b>	<b>23,2%</b>	<b>470.461</b>	<b>19,3%</b>	<b>976.288</b>	<b>21,1%</b>
Compres	156.350	7,2%	277.022	11,4%	433.373	9,4%
Metge/Hospital	48.555	2,2%	77.386	3,2%	125.940	2,7%
Visita amic/familiar	69.693	3,2%	81.755	3,4%	151.448	3,3%
Acompanyar persones	99.328	4,6%	166.561	6,8%	265.889	5,8%
Gestions personals	67.341	3,1%	71.824	2,9%	139.165	3,0%
Oci/diversió/àpats/esport	170.034	7,8%	148.706	6,1%	318.740	6,9%
Passeig	85.584	3,9%	77.174	3,2%	162.759	3,5%
<b>Mobilitat personal</b>	<b>696.885</b>	<b>32,0%</b>	<b>900.428</b>	<b>37,0%</b>	<b>1.597.314</b>	<b>34,6%</b>
Tornada a casa ocupacional	408.468	18,7%	359.942	14,8%	768.410	16,6%
Tornada a casa personal	569.290	26,1%	704.939	28,9%	1.274.230	27,6%
<b>Tornada a casa</b>	<b>977.759</b>	<b>44,8%</b>	<b>1.064.881</b>	<b>43,7%</b>	<b>2.042.640</b>	<b>44,2%</b>
<b>Total</b>	<b>2.180.471</b>	<b>100,0%</b>	<b>2.435.771</b>	<b>100,0%</b>	<b>4.616.241</b>	<b>100,0%</b>

Tabla B. 9. Motivo de los desplazamientos de los residentes en Barcelona. Fuente: EMEF 2016.

En los desplazamientos internos en la ciudad de Barcelona, los flujos por motivos personales son los más importantes. En los desplazamientos de conexión la movilidad ocupacional toma más importancia.

Motiu de desplaçament	INTERNS		CONNEXIÓ		EXTERNS		TOTAL	
	Desplaçaments	%	Desplaçaments	%	Desplaçaments	%	Desplaçaments	%
Mobilitat ocupacional	767.170	19,1%	195.723	35,2%	13.396	28,0%	976.288	21,1%
Mobilitat personal	1.469.412	36,6%	100.723	18,1%	27.178	56,8%	1.597.314	34,6%
Tornada a casa ocupacional	604.893	15,1%	162.424	29,2%	..	..	768.410	16,6%
Tornada a casa personal	1.170.512	29,2%	97.577	17,5%	..	..	1.274.230	27,6%
<b>Total</b>	<b>4.011.986</b>	<b>100,0%</b>	<b>556.447</b>	<b>100,0%</b>	<b>47.809</b>	<b>100,0%</b>	<b>4.616.241</b>	<b>100,0%</b>

Tabla B. 10. Motivo de desplazamiento según tipo de recorrido. Fuente: EMEF 2016.

### Modo de transporte de los residentes en Barcelona

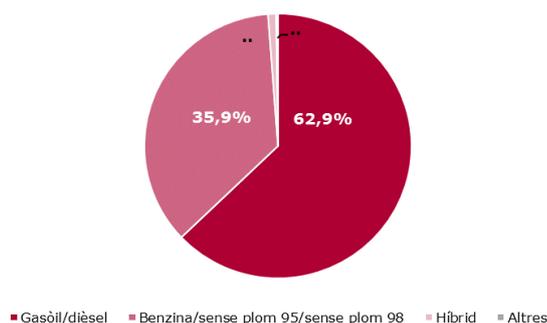
La población residente en Barcelona realiza el 46,8% de sus desplazamientos en modos no motorizados. La cuota de uso del transporte público es del 32,8%, mientras que el transporte privado se usa en un 20,3% de los desplazamientos.

- El uso del coche es el que representa más diferencia entre los barceloneses, siendo superior su uso en hombre que en mujeres.
- En el transporte público también se dan diferencias destacadas, especialmente en el uso del autobús, superior entre las mujeres; por el contrario, el uso del metro es similar.
- Por lo que respecta a los modos no motorizados se observa que las mujeres hacen mayor uso del caminar y los hombres de la bicicleta, aunque con proporciones muy similares.

Mitjà de transport	Homes		Dones		Total	
	Despl.	%	Despl.	%	Despl.	%
Caminant	854.739	39,2%	1.169.318	48,0%	2.024.057	43,8%
Bicicleta	87.306	4,0%	50.573	2,1%	137.879	3,0%
<b>Total no motoritzat</b>	<b>942.045</b>	<b>43,2%</b>	<b>1.219.891</b>	<b>50,1%</b>	<b>2.161.936</b>	<b>46,8%</b>
Autobús	177.880	8,2%	381.558	15,7%	559.438	12,1%
Metro	296.743	13,6%	376.848	15,5%	673.592	14,6%
Altres ferroviaris (FGC, Rodalies Renfe, Tramvia)	98.903	4,5%	116.870	4,8%	215.773	4,7%
Resta transport públic	38.511	1,8%	28.645	1,2%	67.155	1,5%
<b>Total transport públic</b>	<b>612.037</b>	<b>28,1%</b>	<b>903.921</b>	<b>37,1%</b>	<b>1.515.958</b>	<b>32,8%</b>
Cotxe conductor	351.478	16,1%	142.229	5,8%	493.706	10,7%
Cotxe acompanyant	21.938	1,0%	65.849	2,7%	87.787	1,9%
Moto	248.124	11,4%	103.881	4,3%	352.006	7,6%
Resta transport privat	..	..	..	..	..	..
<b>Total transport privat</b>	<b>626.388</b>	<b>28,7%</b>	<b>311.959</b>	<b>12,8%</b>	<b>938.347</b>	<b>20,3%</b>
<b>Total</b>	<b>2.180.471</b>	<b>100,0%</b>	<b>2.435.771</b>	<b>100,0%</b>	<b>4.616.241</b>	<b>100,0%</b>

Tabla B. 11. Desplazamientos según modo de transporte de los residentes en Barcelona. Fuente: EMEF 2016.

En cuanto a las características del parque circulante de transporte privado, en relación a la antigüedad del parque de vehículos, el 72,8% de los desplazamientos se hace con vehículos de 10 años o más. En cuanto a las motos el 74,2% de los desplazamientos se hace con motos de 10 años o más. Los coches que circulan con gasoil o diésel son mayoritarios, casi doblando a los de gasolina.



**Tabla B. 12. Tipo de combustible utilizado por los residentes de Barcelona. Fuente: EMEF 2016.**

La relación entre el combustible utilizado según la antigüedad del vehículo nos permite afirmar que entre el parque de vehículos circulante menor de 15 años el uso del gasoil es muy superior al de la gasolina. Son los coches más antiguos, de más de 15 años en los que esta proporción se invierte.

Los combustibles alternativos (híbridos, eléctricos) comienzan a aparecer entre los coches de menos de 5 años. En este sentido, los coches que circulan con gasoil y diésel tienen una antigüedad media de casi 7 años, mientras que para los de gasolina es de 9 años.

En cuanto al perfil de usuario según el medio de transporte nos encontramos con:

- Las mujeres, de 65 años o más, jubiladas y/o pensionistas y que se desplazan por motivos personales, constituyen el perfil más habitual de la movilidad a pie y en autobús.
- Los hombres, de 30 a 64 años, ocupados y que se desplazan por motivos ocupacionales son los usuarios tipo de la bicicleta, del coche como conductor y de la moto como conductor.
- El perfil de usuario más habitual de los modos ferroviarios y del coche como acompañante son las mujeres de 30 a 64 años, activas ocupadas y que se desplazan por motivos ocupacionales en el primer caso, y por motivos personales en el caso de las acompañantes.

#### Modo de transporte según tipo de recorrido de los residentes de Barcelona

Los usos de los modos de transporte entre la población residente en Barcelona varían según el tipo de recorrido:

- En los flujos internos se utilizan mayoritariamente los modos no motorizados (52,7%), seguidos del transporte público (32,3%) y del transporte privado (15%).
- En los flujos de conexión entre la ciudad de Barcelona y el resto de coronas metropolitanas, se utiliza sobre todo el transporte privado y el transporte público.
- En la movilidad externa es mayoritaria el uso del transporte privado (con un 46% de cuota de uso).

Mode de transport	INTERNS		CONNEXIÓ		EXTERNNS		TOTAL	
	Desplaçaments	%	Desplaçaments	%	Desplaçaments	%	Desplaçaments	%
Modes no motoritzats	2.112.363	52,7%	33.056	5,9%	16.518	34,6%	2.161.936	46,8%
Transport públic	1.296.758	32,3%	209.878	37,7%	..	19,5%	1.515.958	32,8%
Transport privat	602.865	15,0%	313.513	56,3%	21.969	46,0%	938.347	20,3%
<b>Total</b>	<b>4.011.986</b>	<b>100,0%</b>	<b>556.447</b>	<b>100,0%</b>	<b>47.809</b>	<b>100,0%</b>	<b>4.616.241</b>	<b>100,0%</b>

Tabla B. 13. Modo de transporte según tipo de recorrido en Barcelona. Fuente: EMEF 2016.

### Multimodalidad y cadenas modales de los residentes en Barcelona

Según el número de medios de transporte utilizados, los desplazamientos pueden ser unimodales o multimodales, así son unimodales los desplazamientos en los que se utiliza sólo un medio de transporte, mientras que son multimodales los desplazamientos que se hacen con más de un medio de transporte.

- El 89% de los desplazamientos de las personas residentes en Barcelona son unimodales, mientras que el 11% en multimodales.
- Los modos que representan una mayor multimodalidad son los modos no motorizados y el transporte público.
- Los desplazamientos de las mujeres presentan una mayor multimodalidad.

Mitjà de transport	Homes		Dones		Total	
	Etapes	%	Etapes	%	Etapes	%
Caminant	988.353	40,3%	1.364.604	49,0%	2.352.958	45,0%
Bicicleta	90.429	3,7%	52.523	1,9%	142.952	2,7%
<b>Total no motoritzat</b>	<b>1.078.782</b>	<b>44,0%</b>	<b>1.417.127</b>	<b>50,9%</b>	<b>2.495.909</b>	<b>47,7%</b>
Autobús	245.394	10,0%	486.636	17,5%	732.030	14,0%
Metro	344.926	14,1%	412.565	14,8%	757.491	14,5%
Altres ferroviaris (FGC, Rodalies Rer	102.147	4,2%	118.510	4,3%	220.657	4,2%
Resta transport públic	44.380	1,8%	32.349	1,2%	76.729	1,5%
<b>Total transport públic</b>	<b>736.847</b>	<b>30,1%</b>	<b>1.050.060</b>	<b>37,7%</b>	<b>1.786.906</b>	<b>34,1%</b>
Cotxe	379.386	15,5%	211.839	7,6%	591.225	11,3%
Moto	248.722	10,2%	104.578	3,8%	353.301	6,8%
Resta vehicle privat	..	..	..	..	6.558	0,1%
<b>Total vehicle privat</b>	<b>634.042</b>	<b>25,9%</b>	<b>317.042</b>	<b>11,4%</b>	<b>951.083</b>	<b>18,2%</b>
<b>TOTAL ETAPES</b>	<b>2.449.670</b>	<b>100,0%</b>	<b>2.784.229</b>	<b>100,0%</b>	<b>5.233.899</b>	<b>100,0%</b>
<b>TOTAL DESPLAÇAMENTS</b>	<b>2.180.471</b>		<b>2.435.771</b>		<b>4.616.241</b>	
<b>Ràtio etapes/desplaçament:</b>	<b>1,12</b>		<b>1,14</b>		<b>1,13</b>	

Tabla B. 14. Multimodalidad de los residentes en Barcelona. Fuente: EMEF 2016.

Los desplazamientos unimodales, tanto en el caso de hombres como de mujeres, se hacen principalmente caminando y en bicicleta, seguido del transporte público, entre mujeres, y del transporte privado, entre los hombres.

Las cadenas modales más utilizadas para toda la población residente en Barcelona en un día laborable son las que combinan ir a pie o bicicleta con el transporte público.

### Lugar de aparcamiento del vehículo privado de los residentes de Barcelona

El lugar de aparcamiento del coche en un día laborable de las personas residentes en Barcelona es bastante heterogéneo. Así, los lugares más habituales son aparcamientos de propiedad, alquiler o concesión y en la

calle. En función de si se efectúa pago, se observa que casi el 43,5% de los aparcamientos son gratuitos. Por lo que respecta al aparcamiento de la moto, éste se concentra, en día laborable en la calle. El aparcamiento en propiedad y de pago obtiene menos representación que en el caso del coche.

El lugar de aparcamiento del coche muestra diferencias en función del motivo por el cual se efectúa el desplazamiento:

- En los desplazamientos por motivos de trabajo y estudios se utiliza mayoritariamente el aparcamiento reservado en destino.
- En los motivos personales, el aparcamiento en la calle es mayoritario.
- En la vuelta a casa, el aparcamiento en propiedad/alquiler/concesión es el más utilizado, engloba el 74,4 de los viajes por este motivo.

Lloc d'aparcament del cotxe	Mobilitat ocupacional	Mobilitat personal	Tornada a casa	Total
Carrer*	32,7%	41,5%	21,5%	29,8%
Propietat, lloguer o concessió	..	..	74,4%	35,1%
Reservat en destinació (carrer/subterrani)*	51,0%	22,8%	..	22,5%
Altres**	12,4%	32,3%	..	12,7%
<b>Total</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>

Tabla B. 15. Lugar de aparcamiento del automóvil en función del motivo de desplazamiento. Fuente: EMEF 2016.

#### Motivo de desplazamiento y modo de transporte de los residentes de Barcelona

Los barceloneses y barcelonesas cuando se desplazan por motivos de trabajo y estudios y sus respectivas vueltas a casa lo hacen principalmente en transporte público. Cuando el desplazamiento es por motivos personales predomina el ir a pie.

Mode de transport		Motiu de desplaçament				Total
		Mobilitat ocupacional	Mobilitat personal	Tornada a casa ocupacional	Tornada a casa personal	
Desplaçaments	Modes no motoritzats	251.262	954.616	202.071	753.988	2.161.936
	Transport públic	423.263	423.026	325.351	344.318	1.515.958
	Transport privat	301.764	219.672	240.988	175.924	938.347
	<b>Total</b>	<b>976.288</b>	<b>1.597.314</b>	<b>768.410</b>	<b>1.274.230</b>	<b>4.616.241</b>
% columna	Modes no motoritzats	25,7%	59,8%	26,3%	59,2%	46,8%
	Transport públic	43,4%	26,5%	42,3%	27,0%	32,8%
	Transport privat	30,9%	13,8%	31,4%	13,8%	20,3%
	<b>Total</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>
% fila	Modes no motoritzats	11,6%	44,2%	9,3%	34,9%	100,0%
	Transport públic	27,9%	27,9%	21,5%	22,7%	100,0%
	Transport privat	32,2%	23,4%	25,7%	18,7%	100,0%
	<b>Total</b>	<b>21,1%</b>	<b>34,6%</b>	<b>16,6%</b>	<b>27,6%</b>	<b>100,0%</b>

Tabla B. 16. Motivo de desplazamiento de los residentes de Barcelona. Fuente: EMEF 2016.

## El tiempo de la movilidad de los residentes de Barcelona

### a) Distribución horaria de los desplazamientos

La distribución horaria a lo largo de un día laboral según el modo de transporte utilizado muestra como la intensidad de los desplazamientos caminando y en bicicleta es superior a los modos motorizados en casi todas las franjas horarias analizadas. Sólo es de 15 a 16 horas, cuando la movilidad no motorizada decrece. A primera hora de la mañana, de 7 a 9 horas, los desplazamientos en transporte público son los que tienen más intensidad.

Hay que tener en cuenta que la movilidad con los modos no motorizados presenta una pauta diaria similar a la de la movilidad personal.

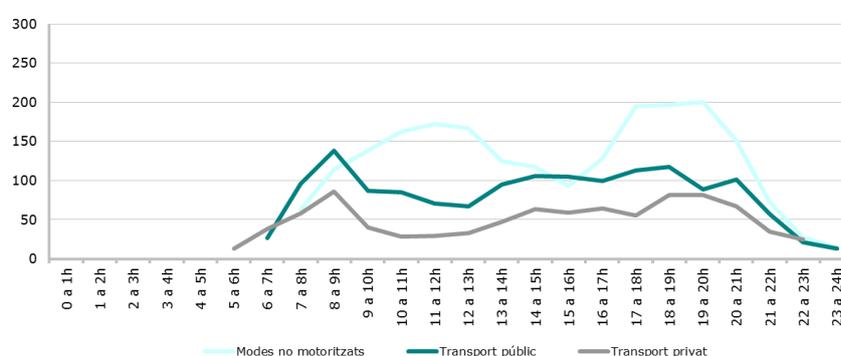


Figura B. 7. Distribución horaria de los desplazamientos según modo de transporte. Fuente: EMEF 2016.

### b) Duración media percibida de los desplazamientos

Los desplazamientos de las personas residentes en Barcelona tienen una duración media percibida de 23.3 minutos. No se observan diferencias según sexos. En toda la población analizada, se constatan variaciones en la duración de los desplazamientos según el tipo de recorrido realizado. Así, si sólo consideramos los desplazamientos internos en Barcelona, la duración media percibida es la más baja, 20.6 minutos. Al considerar los desplazamientos con origen o destino Barcelona, la duración media percibida aumenta hasta los 42.9 minutos. En este caso las diferencias por sexo se acentúan, siendo las mujeres las que tardan más en hacer sus desplazamientos.

Tipus de recorregut	Homes		Dones		Total	
	Durada mitjana	Desplaçaments	Durada mitjana	Desplaçaments	Durada mitjana	Desplaçaments
Interns	20,3	1.807.321	20,9	2.204.665	20,6	4.011.986
Connexió	41,6	337.329	44,9	219.117	42,9	556.447
<b>Total*</b>	<b>23,5</b>	<b>2.180.471</b>	<b>23,1</b>	<b>2.435.771</b>	<b>23,3</b>	<b>4.616.241</b>

\* Inclou desplaçaments interns, connexió i externs

Tabla B. 17. Duración media percibida de los desplazamientos por los residentes de Barcelona. Fuente: EMEF 2016.

La mayoría de los desplazamientos de las personas residentes en Barcelona tienen una duración media de entre 6 y 30 minutos, en concreto, el 67,8%; el 13,2% son desplazamientos con una duración de 5 o menos minutos; los desplazamientos con una duración superior (más de 30 minutos), representa el 19,1% del total.

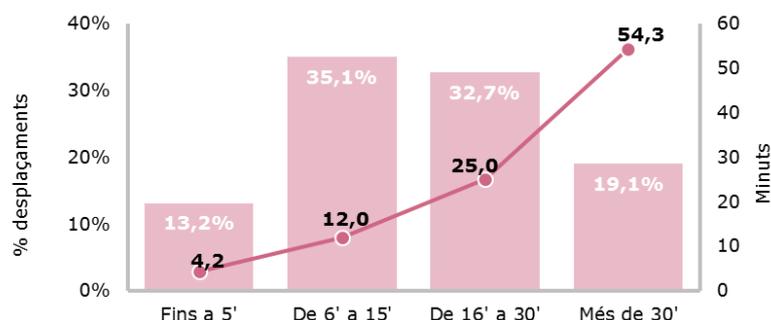


Figura B. 8. Duración media de los desplazamientos en minutos. Fuente: EMEF 2016.

Considerando que la movilidad personal asociada a movilidad a pie y, por tanto, a desplazamientos de menos duración, el tiempo de la movilidad personal es menor a la movilidad ocupacional. El ir a comprar y el acompañar a personas, desplazamientos que normalmente se realizan en un ámbito de proximidad a la residencia, son los percibidos con una menor duración, mientras que los desplazamientos de paseo son los que se perciben más largos.

Motiu de desplaçament	Homes	Dones	Total
	Durada mitjana	Durada mitjana	Durada mitjana
Mobilitat ocupacional	24,1	25,8	24,9
Mobilitat personal	21,0	20,3	20,6
Tornada a casa ocupacional	26,5	28,4	27,4
Tornada a casa personal	23,7	22,2	22,9
<b>Total</b>	<b>23,5</b>	<b>23,1</b>	<b>23,3</b>

Motiu de desplaçament	Homes	Dones	Total
	Durada mitjana	Durada mitjana	Durada mitjana
Treball	23,7	25,8	24,7
Estudis	26,2	25,9	26,0
Compres	13,8	16,6	15,6
Metge/Hospital	23,9	25,9	25,1
Visita amic/familiar	23,2	22,1	22,6
Acompanyar persones	17,1	17,8	17,5
Gestions personals	23,3	21,0	22,1
Oci/diversió/àpats/esports	19,6	19,0	19,3
Passeig	36,6	33,3	35,0
Tornada a casa ocupacional	26,5	28,4	27,4
Tornada a casa personal	23,7	22,2	22,9
<b>Total</b>	<b>23,5</b>	<b>23,1</b>	<b>23,3</b>

Tabla B. 18. Duración media percibida de desplazamiento según motivo. Fuente: EMEF 2016.

Los desplazamientos que se hacen en moto, a pie y en bicicleta son los que se perciben de menor duración media (16, 17 i casi 18 minutos, respectivamente).

Por el contrario, los desplazamientos realizados con Renfe Cercanías y FGC (Ferrocarrils de la Generalitat) son los que se perciben con mayor duración (50 y 37 minutos, respectivamente).

Mitjà de transport	Total
	Durada mitjana
Caminant	17,0
Bicicleta	17,6
Autobús	29,5
Metro	30,6
Tramvia	34,3
FGC	36,9
Renfe Rodalies	50,5
Cotxe com a conductor	26,7
Cotxe com a acompanyant	31,9
Moto com a conductor	15,8
<b>Total</b>	<b>23,3</b>

Tabla B. 19. Duración media percibida de desplazamiento según modo transporte. Fuente: EMEF 2016.

### Dinámicas territoriales de los desplazamientos de los residentes de Barcelona.

Del total de desplazamientos de los residentes en Barcelona en un día laborable, un 86.9% son internos en la ciudad, mientras que un 12.1% se hace hacia otros territorios del STI (desplazamientos de conexión entre coronas). Los desplazamientos internos en los distritos son realizados mayoritariamente por mujeres.

	Homes		Dones		Total	
	Desplaçaments	%	Desplaçaments	%	Desplaçaments	%
Interns districte	841.138	38,6%	1.151.368	47,3%	1.992.506	43,2%
Connexió districte	966.183	44,3%	1.053.297	43,2%	2.019.480	43,7%
Connexió corones	337.329	15,5%	219.117	9,0%	556.447	12,1%
Externs	35.820	1,6%	11.988	0,5%	47.809	1,0%
<b>Total</b>	<b>2.180.471</b>	<b>100,0%</b>	<b>2.435.771</b>	<b>100,0%</b>	<b>4.616.241</b>	<b>100,0%</b>

Tabla B. 20. Dinámicas territoriales de los desplazamientos de los residentes de Barcelona. Fuente: EMEF 2016.

### B. 3 Comparativa temporal de la movilidad en Barcelona en el periodo 2005-2016

Se han analizado los datos de movilidad provenientes de la EMEF entre los periodos 2005-2016 para disponer de la evolución de los principales indicadores de movilidad. Hay que considerar que desde 2014 el Sistema Tarifario Integrado (STI) ha aumentado su ámbito territorial. Esto afecta al análisis de la movilidad en Barcelona, puesto que varía la población de referencia y, por tanto, los desplazamientos realizados. Aunque se trata de una misma fuente de información, la EMEF ha sufrido pequeños cambios metodológicos que pueden influir ligueramente en la comparativa temporal:

- Los datos poblacionales para el año 2005 y hasta el 2013 se han calculado en base a los datos del registro de población del año en curso. En la edición del 2012, los datos fueron ajustados en base a los datos de movilidad de viajeros de los indicadores de movilidad del segundo cuatrimestre de 2012; debido a diversos episodios de huelga en los servicios públicos durante el desarrollo del trabajo de campo.
- En el año 2014 y 2015 se tiene como referente de datos de población el Padrón municipal del 1 de enero del año anterior.

- En el año 2016 los datos de población de referencia son los del Padrón municipal del año en curso.
- En la edición 2006, los datos de la EMEF corresponden al primer trabajo de campo de la encuesta de movilidad cotidiana de 2006 (EMQ 2006).

### La movilidad en Barcelona

La movilidad en Barcelona (flujos con origen y/o destino Barcelona) ha disminuido respecto al 2015 un 10,5%. Especialmente destacable es la reducción de la movilidad interna (-15,8%). En los flujos internos en Barcelona los modos no motorizados son mayoritarios, suponen el 52,1% de esta movilidad. En los desplazamientos de conexión el uso del transporte público se presenta en la media de estos flujos. El uso de modos no motorizados decrece -4,9 puntos porcentuales. El uso del transporte público y privado se incrementan ligeramente.

Any	Tipus de flux	Desplaçaments	No motoritzats	Transport públic	Transport privat
2005	Interns	4.332.869	48,7%	34,3%	17,1%
	Connexió	1.708.368	2,3%	49,6%	48,1%
	<b>Total</b>	<b>6.041.238</b>	<b>35,5%</b>	<b>38,6%</b>	<b>25,9%</b>
2006	Interns	4.253.345	49,8%	31,3%	18,9%
	Connexió	1.859.936	3,6%	46,9%	49,5%
	<b>Total</b>	<b>6.113.281</b>	<b>35,7%</b>	<b>36,1%</b>	<b>28,2%</b>
2007	Interns	4.273.406	50,2%	32,5%	17,3%
	Connexió	1.807.244	2,4%	46,9%	50,7%
	<b>Total</b>	<b>6.080.650</b>	<b>36,0%</b>	<b>36,8%</b>	<b>27,2%</b>
2008	Interns	4.373.872	51,5%	32,7%	15,8%
	Connexió	1.663.110	3,0%	49,5%	47,5%
	<b>Total</b>	<b>6.036.982</b>	<b>38,2%</b>	<b>37,3%</b>	<b>24,5%</b>
2009	Interns	4.383.982	52,4%	32,2%	15,4%
	Connexió	1.696.494	2,5%	48,0%	49,5%
	<b>Total</b>	<b>6.080.476</b>	<b>38,5%</b>	<b>36,6%</b>	<b>24,9%</b>
2010	Interns	4.780.796	55,4%	29,5%	15,1%
	Connexió	1.691.095	3,3%	48,9%	47,8%
	<b>Total</b>	<b>6.471.891</b>	<b>41,7%</b>	<b>34,6%</b>	<b>23,7%</b>
2011	Interns	4.896.260	55,3%	30,8%	13,9%
	Connexió	1.747.648	3,2%	50,0%	46,9%
	<b>Total</b>	<b>6.643.908</b>	<b>41,6%</b>	<b>35,9%</b>	<b>22,6%</b>
2012	Interns	4.967.081	57,4%	29,2%	13,3%
	Connexió	1.726.829	4,3%	51,0%	44,7%
	<b>Total</b>	<b>6.693.909</b>	<b>43,7%</b>	<b>34,9%</b>	<b>21,4%</b>
2013	Interns	4.932.054	57,4%	27,6%	15,0%
	Connexió	1.755.797	3,9%	53,9%	42,2%
	<b>Total</b>	<b>6.687.852</b>	<b>43,3%</b>	<b>34,5%</b>	<b>22,2%</b>
2014	Interns	4.732.522	55,6%	29,3%	15,0%
	Connexió	1.825.409	3,4%	52,4%	44,2%
	<b>Total</b>	<b>6.557.931</b>	<b>41,1%</b>	<b>35,7%</b>	<b>23,1%</b>
2015	Interns	4.990.283	56,0%	29,6%	14,4%
	Connexió	1.834.714	2,9%	50,0%	47,1%
	<b>Total</b>	<b>6.824.998</b>	<b>41,7%</b>	<b>35,1%</b>	<b>23,2%</b>
2016	Interns	4.200.419	52,1%	32,5%	15,5%
	Connexió	1.909.964	3,4%	49,8%	46,8%
	<b>Total</b>	<b>6.110.382</b>	<b>36,8%</b>	<b>37,9%</b>	<b>25,3%</b>
Dif. 2016/2015	Interns	-15,8%	-4,0	2,9	1,0
	Connexió	4,1%	0,5	-0,2	-0,3
	<b>Total</b>	<b>-10,5%</b>	<b>-4,9</b>	<b>2,8</b>	<b>2,1</b>

Tabla B. 21. Evolución de flujos de desplazamiento en el periodo 2005-2016 en Barcelona Fuente: EMEF 2016.

### Ratio público/privado en Barcelona

La evolución en el último año del ratio de desplazamiento público/privado en Barcelona muestra un ligero incremento de los desplazamientos internos y cierta estabilidad en los desplazamientos conectivos. Para el año 2016 el ratio público/privado de los desplazamientos internos se situó en niveles similares a los del año 2009.

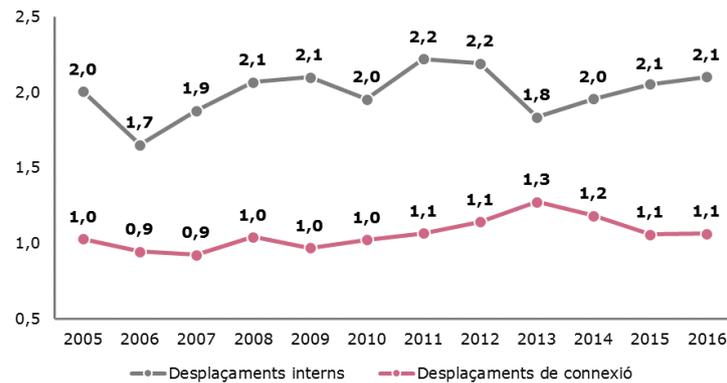


Figura B. 9. Evolución ratio público/privado de desplazamientos en Barcelona. Fuente: EMEF 2016

### Duración media percibida de los desplazamientos en Barcelona

La duración media percibida de los desplazamientos internos y de conexión con Barcelona crece ligeramente respecto del año anterior situándose en valores del 2009.

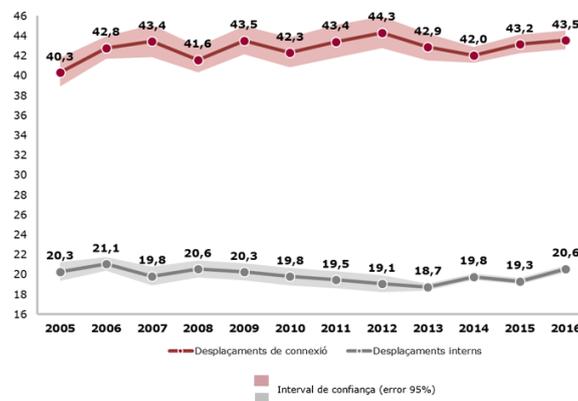


Figura B. 10. Evolución de la duración media percibida de los desplazamientos en Barcelona para el periodo 2005-2016. Fuente: EMEF 2016.

### Índice de apertura (IA) en Barcelona

Entendemos como índice de apertura el cociente entre los desplazamientos de conexión con el exterior (entradas y salidas al territorio) y los desplazamientos internos. Valores inferiores a 1 indican que la movilidad interna tiene un mayor peso relativo (territorio cerrado) y valores superiores a 1 que la movilidad conectiva tiene un mayor peso relativo (territorio abierto).

La evolución del índice de apertura en la ciudad de Barcelona muestra como en todos los años analizados la movilidad interna es superior a la movilidad de conexión (IA<1).

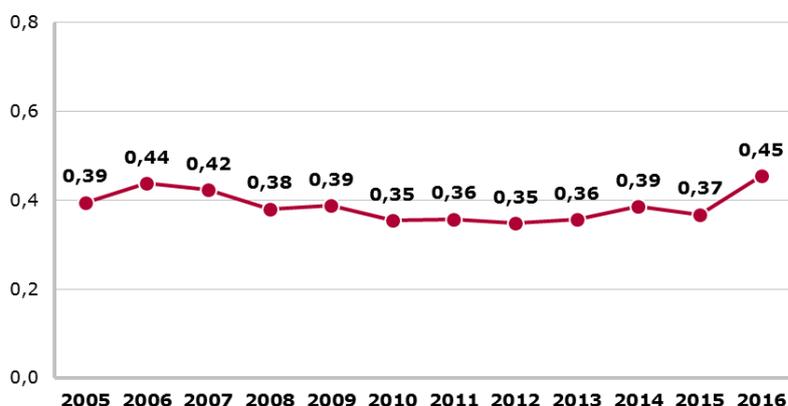


Figura B. 11. Índice de apertura (IA). Fuente: EMEF 2016.

### La movilidad de las personas residentes en Barcelona

Las personas residentes en Barcelona tienen una media diaria de desplazamientos de 3,3 desplazamientos en el año 2016; valor más bajo de su serie histórica. Destacable la reducción del número de desplazamientos, del 15,2%, respecto el año anterior. El grado de movilidad de la población residente en Barcelona ha bajado sensiblemente en el año 2016.

Any	Individus	Desplaçaments	Mitjana desplaçaments diaris
2005	1.394.184	4.616.761	3,31
2006	1.404.491	4.749.993	3,38
2007	1.399.959	4.804.273	3,43
2008	1.420.933	4.768.916	3,36
2009	1.427.203	4.820.541	3,38
2010	1.416.694	5.259.748	3,71
2011	1.411.603	5.360.212	3,80
2012	1.415.212	5.387.255	3,81
2013	1.405.168	5.281.496	3,76
2014	1.400.003	5.201.227	3,72
2015	1.392.665	5.443.945	3,91
2016	1.393.058	4.616.241	3,31
<b>Diferències 2016-2015 Absolutes</b>	<b>393</b>	<b>-827.703</b>	<b>-0,6</b>
<b>Diferències 2016-2015 Relatives</b>	<b>0,0%</b>	<b>-15,2%</b>	<b>-15,2%</b>

Tabla B. 22. Evolución de los desplazamientos diarios en el periodo 2005-2016 de los residentes de Barcelona (I). Fuente: EMEF 2016.

La movilidad de los residentes en Barcelona se ha reducido en 2016, especialmente, por la movilidad personal, que baja un 23,6% respecto 2015. Por otro lado, la movilidad en modos no motorizados es la que más se reduce respecto 2015 (-21,6%).

Any	Motiu del desplaçament			Mode de transport			Total BCN
	Tornada a casa	Mobilitat ocupacional	Mobilitat personal	No motoritzats	Transport públic	Transport privat	
2005	2.020.631	1.028.222	1.567.907	2.111.235	1.453.946	1.051.579	<b>4.616.760</b>
	43,8%	22,3%	34,0%	45,7%	31,5%	22,8%	<b>100,0%</b>
2006	2.120.581	1.059.752	1.569.659	2.102.686	1.513.212	1.134.095	<b>4.749.992</b>
	44,6%	22,3%	33,0%	44,3%	31,9%	23,9%	<b>100,0%</b>
2007	2.131.235	1.094.897	1.578.141	2.137.345	1.548.410	1.118.519	<b>4.804.273</b>
	44,4%	22,8%	32,8%	44,5%	32,2%	23,3%	<b>100,0%</b>
2008	2.144.163	1.014.551	1.610.202	2.244.007	1.539.005	985.904	<b>4.768.916</b>
	45,0%	21,3%	33,8%	47,1%	32,3%	20,7%	<b>100,0%</b>
2009	2.135.141	902.885	1.782.515	2.280.836	1.532.486	1.007.219	<b>4.820.541</b>
	44,3%	18,7%	37,0%	47,3%	31,8%	20,9%	<b>100,0%</b>
2010	2.268.668	964.289	2.026.792	2.632.868	1.597.675	1.029.206	<b>5.259.749</b>
	43,1%	18,3%	38,5%	50,1%	30,4%	19,6%	<b>100,0%</b>
2011	2.317.995	945.369	2.096.847	2.716.524	1.632.555	1.011.132	<b>5.360.212</b>
	43,2%	17,6%	39,1%	50,7%	30,5%	18,9%	<b>100,0%</b>
2012	2.308.415	918.422	2.160.418	2.834.053	1.606.613	946.589	<b>5.387.255</b>
	42,8%	17,0%	40,1%	52,6%	29,8%	17,6%	<b>100,0%</b>
2013	2.309.954	887.267	2.084.275	2.797.798	1.512.227	971.471	<b>5.281.496</b>
	43,7%	16,8%	39,5%	53,0%	28,6%	18,4%	<b>100,0%</b>
2014	2.252.248	909.240	2.039.739	2.606.700	1.571.480	1.023.047	<b>5.201.227</b>
	43,3%	17,5%	39,2%	50,1%	30,2%	19,7%	<b>100,0%</b>
2015	2.370.386	982.856	2.090.702	2.757.066	1.608.549	1.078.330	<b>5.443.945</b>
	43,5%	18,1%	38,4%	50,6%	29,5%	19,8%	<b>100,0%</b>
2016	2.042.640	976.288	1.597.314	2.161.936	1.515.958	938.347	<b>4.616.241</b>
	44,2%	21,1%	34,6%	46,8%	32,8%	20,3%	<b>100,0%</b>
<b>Dif. absolutes 2015-2016</b>	<b>-327.747</b>	<b>-6.568</b>	<b>-493.388</b>	<b>-595.129</b>	<b>-92.591</b>	<b>-139.982</b>	<b>-827.703</b>
<b>Dif. relatius 2015-2016</b>	<b>-13,8%</b>	<b>-0,7%</b>	<b>-23,6%</b>	<b>-21,6%</b>	<b>-5,8%</b>	<b>-13,0%</b>	<b>-15,2%</b>

Tabla B. 23. Evolución de los desplazamientos diarios en el periodo 2005-2016 de los residentes de Barcelona (II). Fuente: EMEF 2016.

En cuanto a la evolución de los desplazamientos según motivo, se incrementa la proporción de desplazamientos por motivos ocupacionales, en detrimento de la movilidad personal. Si en el año 2013 se observa un cierto estancamiento, tanto de la movilidad ocupacional como de la personal, en el año 2016 se muestra un incremento de la movilidad ocupacional en detrimento de la personal.

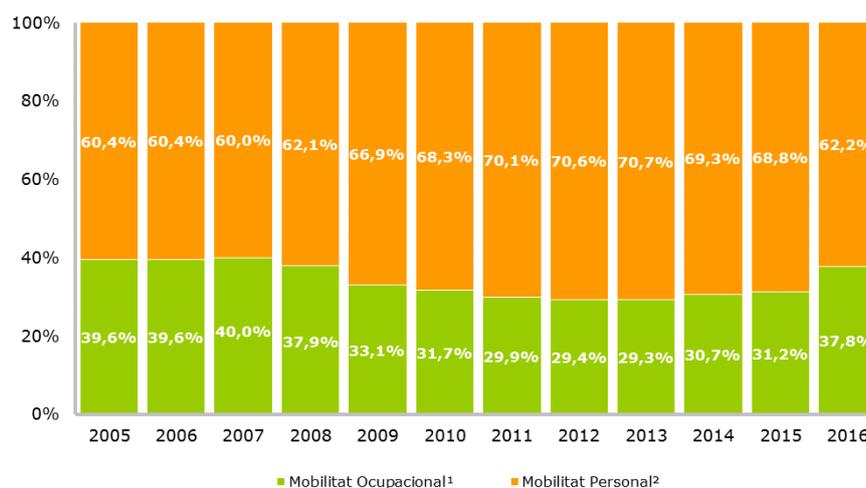


Figura B. 12. Evolución del motivo de desplazamiento de los residentes de Barcelona en el periodo 2005-2016: Fuente: EMEF 2016.

Por lo que respecta al reparto modal en 2016 se muestra una mayor proporción del uso del transporte público en toda la serie analizada (32,8%). El peso del transporte privado también se incrementa en 2016 hasta representar el 20,3% de los desplazamientos internos, reduciéndose los modos no motorizados.

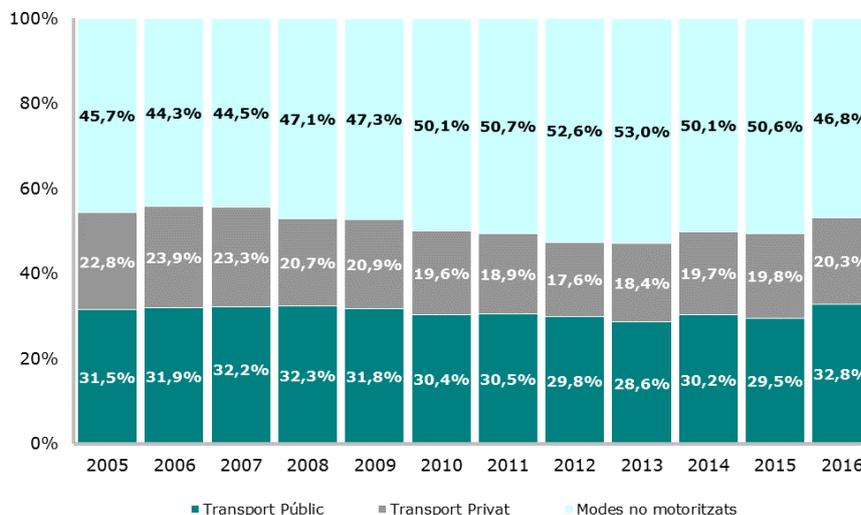


Figura B. 13. Evolución del reparto modal en Barcelona en el periodo 2005-2016. Fuente: EMEF 2016.

Ratio público/privado de los residentes en Barcelona

La ratio entre transporte público y transporte privado permite analizar la relación entre los modos mecanizados. La obtención de valores inferiores a 1 denota el predominio del transporte privado, mientras que valores superiores a 1 manifiestan el predominio del transporte público. En el año 2016 el valor de la ratio se situó en el 1,62, valor ligeramente superior al de los últimos 4 años, aunque continúa mostrando el predominio del uso del transporte público, respecto del transporte privado, entre las personas residentes en Barcelona.

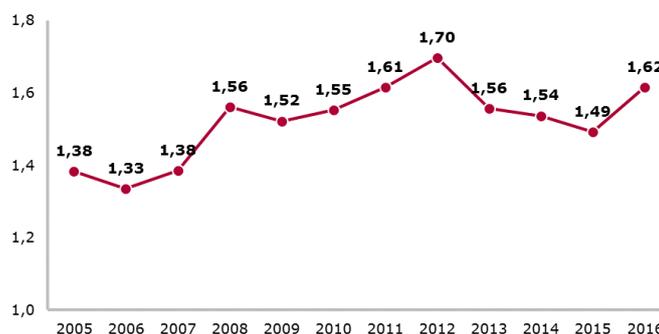


Figura B. 14. Evolución de la ratio transporte publico/privado de lo residentes en Barcelona. Fuente: EMEF 2016.

Ocupación del coche de los residentes en Barcelona

Entre los años 2005 y 2016 se observa una ligera reducción en la tasa de ocupación del coche. En todos los años, la declarada es ligeramente superior a la calculada.

Any	Cotxe	
	Ocupació calculada	Ocupació declarada
2005	1,25	nd
2006	1,23	nd
2007	1,17	nd
2008	1,19	nd
2009	1,32	nd
2010	1,23	nd
2011	1,27	1,76
2012	1,31	1,75
2013	1,28	1,71
2014	1,20	1,69
2015	1,20	1,69
2016	1,18	1,58

Tabla B. 24. Evolución del índice de ocupación del automóvil de los residentes en Barcelona. Fuente: EMEF 2016.

Duración media percibida de los desplazamientos según motivo de los residentes en Barcelona

La evolución de la duración declarada de las personas residentes en Barcelona para los desplazamientos por motivos ocupacionales muestra una ligera disminución en el último año analizado, mientras que se observa un ligero aumento para los desplazamientos por motivos personales.

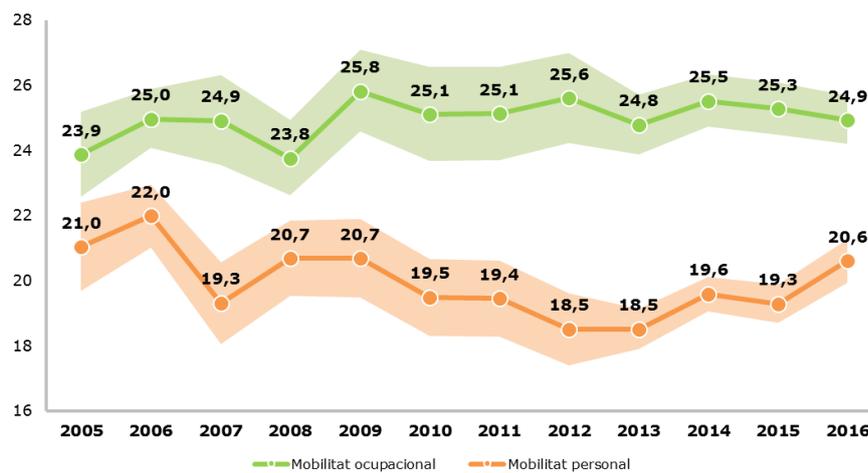


Figura B. 15. Evolución de la duración media percibida de los desplazamientos según motivo por los residentes de Barcelona en el periodo 2005-2016. Fuente: EMEF 2016.

Duración media percibida de los desplazamientos según modo de transporte de los residentes en Barcelona.

La evolución temporal de la duración declarada de las personas residentes en Barcelona de los desplazamientos según el modo de transporte utilizado, muestra una disminución en el caso del transporte privado, y un aumento en los desplazamientos en transporte público y para los modos no motorizados.

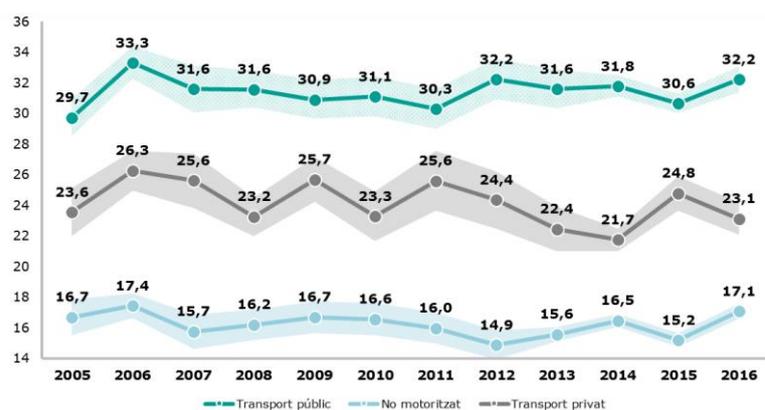


Figura B. 16. Evolución de la duración media percibida de los desplazamientos según modo por los residentes de Barcelona en el periodo 2005-2016. Fuente: EMEF 2016.

### La gestión del tráfico y sus indicadores en la ciudad de Barcelona

A continuación, se adjuntan una serie de datos relacionados con la gestión del tráfico en la ciudad de Barcelona proporcionado por el Ayuntamiento de Barcelona:

a)

VEHICLES	2013*	2014	2015	2016	2017	%17/14	%17/16
Total	914.511	916.522	928.512	946.914	962.111	5,0%	1,6%
Turismes	564.194	564.700	570.345	580.399	587.866	4,1%	1,3%
Motos	203.414	207.573	214.837	223.671	231.203	11,4%	3,4%
Ciclomotors	63.275	60.758	58.881	57.037	56.118	-7,6%	-1,6%
Furgonetes	41.875	42.869	43.948	45.390	46.250	7,9%	1,9%
Camions	22.044	21.171	22.044	20.522	20.366	-3,8%	-0,8%
Altres vehicles	19.709	19.451	19.738	19.895	20.308	4,4%	2,1%

b)

VELOCITAT (km/h)	2012	2013	2014	2015	2016	%16/13	%16/15
Vies connectivit at externa	23,6	23,5	22,9	s.d	28,7	22,0%	-
Vies mar-muntanya	16,8	17,1	17,0	s.d	13,0	-24,0%	-
Vies transversals	23,3	23,3	22,8	s.d	22,3	-4,3%	-
Mitjana de ciutat	20,9	21,0	20,6	s.d	21,8	3,6%	-
Rondes	59,9	59,5	59,2	s.d	48,4	-18,7%	-

Tabla B. 25. a) Número de vehículos en la ciudad de Barcelona. b) Evolución de la velocidad de circulación en Barcelona. Fuente: Ayuntamiento de Barcelona.

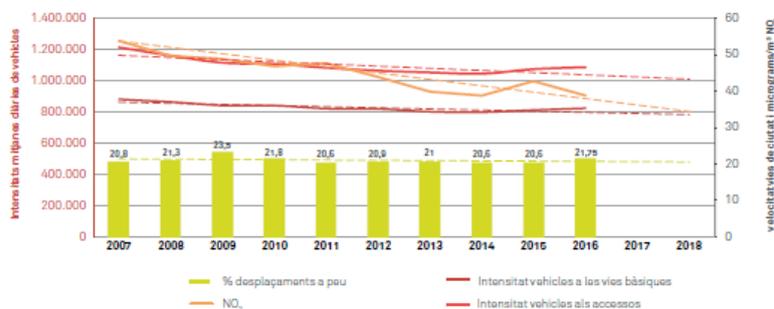


Figura B. 17. Evolución de la intensidad de tráfico en accesos y vías básicas y contaminación NO2 Fuente: Ayuntamiento de Barcelona.



Figura B. 18. Red básica de transporte de Barcelona. Fuente: Ayuntamiento de Barcelona

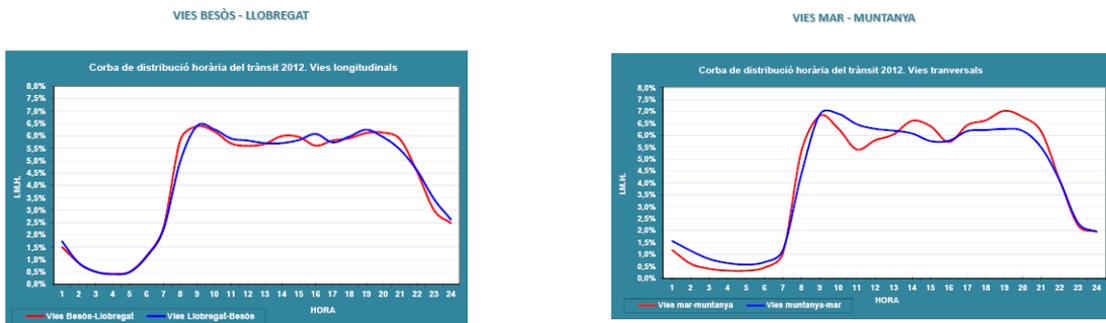


Figura B. 19. Evolución horaria del tráfico en las vías principales de Barcelona. Fuente: Ayuntamiento de Barcelona.



Figura B. 20 Evolución horaria del tráfico en las rondas. Fuente: Ayuntamiento de Barcelona.

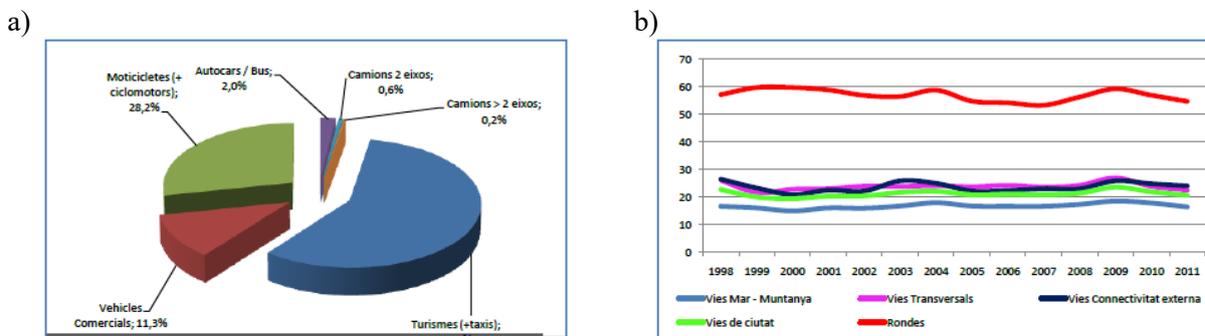


Figura B. 21. a) Composición del tráfico en Barcelona. b) Evolución de la velocidad media en vehículo privado. Fuente: Ayuntamiento de Barcelona.

## **ANEJO C. Tabla de reparto modal en la red secundaria**

Tabla C. 1. Tabla de reparto modal en la red secundaria para la situación de peaje 9 cts/km.

RECORRIDO	TMP VP (min)	COST VP	T AiD Ferro	T Espera Ferro	T Viatge Ferro	T AiD BUS	T Espera BUS	T Viatge BUS	TMP VP FUT (min)	U VP	% COTXE	%BUS	% MOD FER
Diputació: Marina -> Tarragona	14,00	6,00	2,00	3,00	21,00	5,00	7,00	21,00	15,50	-2,70	15%	33%	52%
Consell de Cent: Vilamari --> Diagonal	15,00	6,00	4,00	3,00	20,00	10,00	7,00	19,00	16,80	-2,74	16%	30%	54%
Mallorca: Roger de Lluria --> Av. Roma	8,00	6,00	12,00	4,00	15,00	5,00	7,00	9,00	10,10	-2,51	17%	50%	32%
Pujades: Selva de Mar --> Marina	12,00	6,00	5,00	5,00	5,00	2,00	10,00	9,00	13,60	-2,63	12%	38%	50%
Calabria: Parlament -> Londres	10,00	6,00	15,00	4,00	4,00	7,00	7,00	11,00	11,50	-2,56	17%	42%	40%
Llança: Aragó -> Travessera les Corts	6,00	6,00	11,00	4,00	4,00	4,00	6,00	7,00	8,90	-2,47	14%	47%	39%
Rocafort: Av. Josep Tarradellas -> Manso	9,00	6,00	12,00	4,00	4,00	9,00	8,00	12,00	10,40	-2,52	18%	34%	48%
Els Vergos-> Paral·lel	26,00	6,00	10,00	8,00	22,00	4,00	8,00	28,00	28,00	-3,13	16%	45%	38%
Conde Borrell: Valencia -> Tamarit	17,00	6,00	11,00	8,00	2,00	8,00	8,00	16,00	20,70	-2,88	14%	36%	49%
Casanova: Ronda Sant Antoni -> Provença	6,00	6,00	10,00	9,00	3,00	6,00	9,00	5,00	8,10	-2,44	18%	45%	37%
Carrer Lepant: Ronda Guinardo -> Av. Icaria	14,00	6,00	7,00	5,00	12,00	3,00	8,00	21,00	17,90	-2,78	14%	37%	49%
Zamora: Av. Iacaria-> Travessera de Gracia	13,00	6,00	14,00	5,00	12,00	7,00	8,00	22,00	13,90	-2,64	22%	37%	41%
Pere IV: Zamora -> Diagonal	11,00	6,00	8,00	5,00	3,00	6,00	9,00	6,00	12,50	-2,59	13%	38%	49%
Sant fructuos: Mexic -> Passeig Zona Franca	7,00	6,00	13,00	10,00	2,00	8,00	2,00	6,00	9,10	-2,48	16%	57%	28%
Rector Triadó-Comptes Bell-lloc: Gran Via -> Travessera de les Corts	18,00	6,00	10,00	4,00	5,00	11,00	7,00	10,00	20,40	-2,87	13%	34%	53%
Pujades-Cristobal de Moura: Bilbao -> Diagonal	11,00	6,00	6,00	5,00	6,00	6,00	9,00	14,00	11,80	-2,57	15%	31%	54%
Trueta: Ramón Trias Fargas -> Rambla Poblenou	7,00	6,00	12,00	5,00	5,00	6,00	8,00	10,00	8,80	-2,47	18%	41%	41%
Ramon Turró: Rambla Poblenou -> Marina	7,00	6,00	10,00	5,00	5,00	6,00	8,00	7,00	7,90	-2,43	17%	41%	42%
Brusi-Madrado: Via Augusta -> Diagonal	7,00	6,00	11,00	7,00	1,00	3,00	5,00	6,00	8,30	-2,45	14%	53%	33%
Rambla Catalunya: Gran Via -> Diagonal	8,00	6,00	9,00	4,00	2,00	6,00	7,00	7,00	9,60	-2,49	14%	39%	47%
Luça-Galileu: Av. Madrid -> Travessera de les Corts	5,00	6,00	10,00	4,00	3,00	8,00	8,00	5,00	7,70	-2,43	16%	37%	47%

Tabla C. 2. Tabla de reparto modal en la red secundaria para la situación de peaje 16 cts/km.

RECORRIDO	TMP VP (min)	COST VP	T AiD Ferro	T Espera Ferro	T Viatge Ferro	T AiD BUS	T Espera BUS	T Viatge BUS	TMP VP FUT (min)	U VP	% COTXE	%BUS	% MOD FER
Diputació: Marina -> Tarragona	14,00	6,00	2,00	3,00	21,00	5,00	7,00	21,00	17,70	-2,77	13%	33%	53%
Consell de Cent: Vilamari --> Diagonal	15,00	6,00	4,00	3,00	20,00	10,00	7,00	19,00	18,90	-2,82	15%	30%	55%
Mallorca: Roger de Lluria --> Av. Roma	8,00	6,00	12,00	4,00	15,00	5,00	7,00	9,00	12,60	-2,60	16%	51%	33%
Pujades: Selva de Mar --> Marina	12,00	6,00	5,00	5,00	5,00	2,00	10,00	9,00	15,20	-2,69	11%	38%	51%
Calabria: Parlament -> Londres	10,00	6,00	15,00	4,00	4,00	7,00	7,00	11,00	13,20	-2,62	16%	43%	41%
Llança: Aragó -> Travessera les Corts	6,00	6,00	11,00	4,00	4,00	4,00	6,00	7,00	10,20	-2,51	13%	47%	39%
Rocafort: Av. Josep Tarradelles -> Manso	9,00	6,00	12,00	4,00	4,00	9,00	8,00	12,00	13,50	-2,63	16%	34%	49%
Els Vergos-> Paral·lel	26,00	6,00	10,00	8,00	22,00	4,00	8,00	28,00	30,30	-3,21	15%	46%	39%
Conde Borrell: Valencia -> Tamarit	17,00	6,00	11,00	8,00	2,00	8,00	8,00	16,00	22,40	-2,94	13%	37%	49%
Casanova: Ronda Sant Antoni -> Provença	6,00	6,00	10,00	9,00	3,00	6,00	9,00	5,00	10,70	-2,53	16%	45%	38%
Carrer Lepant: Ronda Guinardo -> Av. Icaria	14,00	6,00	7,00	5,00	12,00	3,00	8,00	21,00	19,10	-2,82	13%	37%	49%
Zamora: Av. Iacaria-> Travessera de Gracia	13,00	6,00	14,00	5,00	12,00	7,00	8,00	22,00	14,70	-2,67	21%	37%	42%
Pere IV: Zamora -> Diagonal	11,00	6,00	8,00	5,00	3,00	6,00	9,00	6,00	14,20	-2,65	13%	38%	49%
Sant fructuos: Mexic -> Passeig Zona Franca	7,00	6,00	13,00	10,00	2,00	8,00	2,00	6,00	11,60	-2,56	14%	57%	28%
Rector Triadó-Comptes Bell-lloc: Gran Via -> Travessera de les Corts	18,00	6,00	10,00	4,00	5,00	11,00	7,00	10,00	22,40	-2,94	12%	35%	54%
Pujades-Cristobal de Moura: Bilbao -> Diagonal	11,00	6,00	6,00	5,00	6,00	6,00	9,00	14,00	12,50	-2,59	15%	31%	54%
Trueta: Ramón Trias Fargas -> Rambla Poblenou	7,00	6,00	12,00	5,00	5,00	6,00	8,00	10,00	9,60	-2,49	17%	41%	41%
Ramon Turró: Rambla Poblenou -> Marina	7,00	6,00	10,00	5,00	5,00	6,00	8,00	7,00	8,80	-2,47	16%	41%	42%
Brusi-Madrado: Via Augusta -> Diagonal	7,00	6,00	11,00	7,00	1,00	3,00	5,00	6,00	9,30	-2,48	13%	53%	34%
Rambla Catalunya: Gran Via -> Diagonal	8,00	6,00	9,00	4,00	2,00	6,00	7,00	7,00	11,30	-2,55	13%	39%	48%
Luça-Galileu: Av. Madrid -> Travessera de les Corts	5,00	6,00	10,00	4,00	3,00	8,00	8,00	5,00	9,70	-2,50	15%	38%	47%

**Tabla C. 3. Tabla de reparto modal en la red secundaria para la situación de peaje 30 cts/km.**

RECORRIDO	TMP VP (min)	Coste VP	T AiD Ferro	T Espera Ferro	T Viatge Ferro	T AiD BUS	T Espera BUS	T Viatge BUS	TMP VP FUT (min)	U VP	% COTXE	%BUS	% MOD FER
Diputació: Marina -> Tarragona	14,00	6,00	2,00	3,00	21,00	5,00	7,00	21,00	21,70	-2,91	5%	34%	54%
Consell de Cent: Vilamari --> Diagonal	15,00	6,00	4,00	3,00	20,00	10,00	7,00	19,00	22,70	-2,95	13%	30%	56%
Mallorca: Roger de Lluria --> Av. Roma	8,00	6,00	12,00	4,00	15,00	5,00	7,00	9,00	15,30	-2,69	15%	52%	33%
Pujades: Selva de Mar --> Marina	12,00	6,00	5,00	5,00	5,00	2,00	10,00	9,00	20,20	-2,86	9%	39%	52%
Calabria: Parlament -> Londres	10,00	6,00	15,00	4,00	4,00	7,00	7,00	11,00	16,90	-2,75	14%	44%	42%
Llança: Aragó -> Travessera les Corts	6,00	6,00	11,00	4,00	4,00	4,00	6,00	7,00	14,20	-2,65	12%	48%	40%
Rocafort: Av. Josep Tarradellas -> Manso	9,00	6,00	12,00	4,00	4,00	9,00	8,00	12,00	17,20	-2,76	14%	35%	50%
Els Vergos-> Paral·lel	26,00	6,00	10,00	8,00	22,00	4,00	8,00	28,00	35,20	-3,38	13%	47%	40%
Conde Borrell: Valencia -> Tamarit	17,00	6,00	11,00	8,00	2,00	8,00	8,00	16,00	27,60	-3,12	11%	38%	51%
Casanova: Ronda Sant Antoni -> Provença	6,00	6,00	10,00	9,00	3,00	6,00	9,00	5,00	14,30	-2,66	14%	46%	39%
Carrer Lepant: Ronda Guinardo -> Av. Icaria	14,00	6,00	7,00	5,00	12,00	3,00	8,00	21,00	24,20	-3,00	11%	38%	50%
Zamora: Av. Icaria-> Travessera de Gracia	13,00	6,00	14,00	5,00	12,00	7,00	8,00	22,00	17,20	-2,76	19%	38%	42%
Pere IV: Zamora -> Diagonal	11,00	6,00	8,00	5,00	3,00	6,00	9,00	6,00	17,30	-2,76	11%	39%	50%
Sant fructuos: Mexic -> Passeig Zona Franca	7,00	6,00	13,00	10,00	2,00	8,00	2,00	6,00	16,10	-2,72	12%	59%	29%
Rector Triadó-Comptes Bell-lloc: Gran Via -> Travessera de les Corts	18,00	6,00	10,00	4,00	5,00	11,00	7,00	10,00	25,90	-3,06	10%	35%	54%
Pujades-Cristobal de Moura: Bilbao -> Diagonal	11,00	6,00	6,00	5,00	6,00	6,00	9,00	14,00	17,10	-2,75	12%	32%	55%
Trueta: Ramón Trias Fargas -> Rambla Poblenou	7,00	6,00	12,00	5,00	5,00	6,00	8,00	10,00	13,90	-2,64	15%	42%	42%
Ramon Turró: Rambla Poblenou -> Marina	7,00	6,00	10,00	5,00	5,00	6,00	8,00	7,00	12,50	-2,59	14%	42%	43%
Brusi-Madrado: Via Augusta -> Diagonal	7,00	6,00	11,00	7,00	1,00	3,00	5,00	6,00	12,30	-2,59	12%	54%	34%
Rambla Catalunya: Gran Via -> Diagonal	8,00	6,00	9,00	4,00	2,00	6,00	7,00	7,00	14,20	-2,65	12%	40%	48%
Luça-Galileu: Av. Madrid -> Travessera de les Corts	5,00	6,00	10,00	4,00	3,00	8,00	8,00	5,00	12,90	-2,61	13%	38%	48%

## ANEJO D. Valores utilizados para los costes de operación

VARIABLE	NOM.	V.P.	Bus Conv.	Metro	Tranvía	FGC	Rodalies	Unidad	Fuente
Adquisición vehículo	Cv		250.000	8.400.000	3.200.000	5.250.000	5.250.000	€	TMB,SAITt
Vida útil vehículo	Vuv		12	30	30	30	30	años	TMB,SAITt
Seguros	Cs		5713	3520	3520	3520	3520	€/año	TMB,Trammet
Impuestos	Cimp		0	0	0	0	0	€/año	TMB,Trammet
Consumo carburante	Fc	0,08	0,55					l/km	TMB
Consumo eléctrico	Fcelec			4,56	4,6	4,56	4,56	Kwh/km	Energia Demo
Precio combustible	Pc	1,3	1,3					€/l	Respsol
Precio de la energía	Pwh			0,11	0,11	0,11	0,11	€/Kwh	Endesa
Precio del lubricante	Pl	4	4					€/l	Repsol
Vida útil neumáticos	Vn	80000	80000					km	Michelin
Neumáticos por autobús	Nn	4	6					n	TMB
Precio neumático	Pn	150	400					€/neum	Michelin
Precio mantenimiento anual vehículo	Pmr	0,05	0,38	1,07	1,07	1,07	1,07	€/km	TMB,Trammet
Coste medio conductores	Scond		33.250	33.250	33.250	33.250	33.250	€/año	TMB,Trammet
Conductores por vehículo año	Ncond/veh		2,6	3	3	3	3	n	TMB,Trammet

## ANEJO E. Cálculo de los costes de funcionamiento del vehículo privado

En este anejo presentamos la metodología empleada para el cálculo de los costes de funcionamiento ahorrados del vehículo privado tras la aplicación del peaje urbano. Los costes directos considerados han sido el combustible, lubricantes, neumáticos y el mantenimiento de los vehículos.

### - Combustible

El coste anual del combustible se calcula en función de las condiciones de circulación de cada ciudad y teniendo en cuenta el consumo de los vehículos por kilómetro recorrido, según la expresión:

$$\text{Combustible} = f_c \cdot Veh\ Km \cdot P_c \quad (\text{AE.1})$$

Donde:

$f_c$	Factor de consumo de combustible (litro/km).
$Veh\ Km$	Vehículos kilómetros año de los vehículos privados (Km/año)
$P_c$	Precio medio del combustible impuesto excluidos (€/litro)

A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

	$f_c$	$Veh\ Km$ (en millones)	$P_c$	Coste combustible anual (Millones €/año)
P= 9 cts/km	0,08	223	0,61	11
P=16 cts/km	0,08	391	0,61	19
P=30 cts/km	0,08	548	0,61	27

Tabla E. 1 Costes de combustible ahorrados para los diferentes escenarios tarifarios.

### - Lubricantes:

Siguiendo las indicaciones del MOPU<sup>114</sup> (1990) para evaluar el consumo de lubricante, este se mide como un porcentaje del consumo de combustible. Ese asigna un valor del 0,8% para los autobuses. Estos valores han sido obtenidos en ensayos experimentales de un vehículo circulando a una velocidad constante. Así pues, el coste anual del lubricante se obtiene según la expresión:

$$\text{Lubricante} = 0,008 f_l \cdot Veh\ Km \cdot P_l \quad (\text{AE.2})$$

Donde:

$f_l$	Factor de consumo de lubricante (litro/km).
-------	---

<sup>114</sup> El Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, también conocido por sus siglas MOPU, fue un departamento ministerial español que existió desde el inicio de la Legislatura Constituyente hasta el final de la IV Legislatura. Se encargaba de regular las obras civiles en el territorio español.

$Veh Km$  Vehículos kilómetros año de los vehículos privados (Km/año)  
 $P_l$  Precio medio del lubricante impuestos excluidos (€/litro)

A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

	$f_l$	$Veh Km$ (en millones)	$P_l$	Coste lubricante anual (Millones €/año)
P= 9 cts/km	0,001	223	2,3	Despreciable
P=16 cts/km	0,001	391	2,3	0,1
P=30 cts/km	0,001	548	2,3	0,1

Tabla E. 2 Costes de lubricante ahorrados para los diferentes escenarios tarifarios.

- Neumáticos:

El coste anual de los neumáticos se calcula a partir de la vida útil de los neumáticos o de los kilómetros recorridos entre recambios según la expresión:

$$Neumáticos = Veh Km \cdot n \cdot P_N / V_n \quad (AE.3)$$

Donde:

$Veh Km$  Factor de consumo de combustible (litro/km).  
 $V_n$  Vida útil del neumático (neumático/km)  
 $n$  Número de neumáticos que tiene un vehículo)  
 $P$  Precio medio del neumático (€/neumático)

A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

	Costes neumáticos anual (Millones €/año)
P= 9 cts/km	2
P=16 cts/km	3
P=30 cts/km	4

Tabla E. 3 Costes de neumáticos ahorrados para los diferentes escenarios tarifarios.

- Mantenimiento.

El coste anual del mantenimiento y reparación depende de la velocidad y de los kilómetros recorridos según la expresión:

$$C_{mr} = Veh Km \cdot p_{mr} \quad (Rabaza \& Estrada, 2009) \quad (AE.4)$$

Donde:

- $C_{mr}$  Coste unitario debido a las reparaciones
- $L_{anual}$  Longitud anual recorrida
- $p_{mr}$  Precio medio kilómetro de las reparaciones

A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

	<i>Veh Km</i> (en millones)	$p_{mr}$	Coste mto. y repar. anual (Millones €/año)
P= 9 cts/km	223	0,05	11
P=16 cts/km	391	0,05	20
P=30 cts/km	548	0,05	27

**Tabla E. 4 Costes de mantenimiento y reparación ahorrados para los diferentes escenarios tarifarios.**

## ANEJO F. Cálculo de operación y mantenimiento de la nueva flota de transporte público

### Coste anual de operación y mantenimiento de los nuevos vehículos ( $C_{o,m_i}$ )

Como ya se ha comentado, el cálculo del coste anual de operación y mantenimiento incluye un gran número de factores a tener en cuenta. Estos costes se pueden dividir en costes fijos o indirectos, que son los costes provocados por el hecho de tener el vehículo, sin necesidad de circular; y por lo tanto dependen del número de vehículos; y una serie de costes directos relacionados con la circulación del vehículo, que son función de los kilómetros recorridos.

$$C_{o,m_i} = C_{vf} \cdot n_v + c_{mv} \cdot L_i \quad (\text{AF.1})$$

Donde:

- $C_{o,m_i}$  Coste anual de operación y mantenimiento de los nuevos vehículos de transporte público
- $C_{vf}$  Costes fijos/indirectos de los nuevos vehículos del transporte público adicional
- $n_v$  Número de nuevos vehículos del transporte público adicional
- $C_m$  Costes kilométricos/directos del transporte público adicional
- $L_i$  Distancia recorrida anualmente por los vehículos

Indicar que dentro de los costes fijos no se ha considerado el porcentaje proporcional de estructura empresarial al partir de la hipótesis de que la gestión de la flota adicional se realizaría con la misma estructura empresarial.

- Costes fijos o indirectos:
  - Costes de personal: en el presente estudio sólo tendremos en cuenta los salarios de los conductores de los vehículos de las líneas. No se consideran costes indirectos derivados de la estructura empresarial.

$$Cl_{pr} = S_{cond} \cdot n_{cond}/veh \quad (\text{AF.2})$$

Donde:

- $Cl_{pr}$  Coste unitario anual debido a los salarios de personal
- $S_{cond}$  Salario anual de un conductor
- $n_{cond}/veh$  Número de conductores necesarios por vehículo

A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

	Coste personal anual Bus (Millones €/año)	Coste personal anual medios ferroviarios (Millones €/año)
P=9 cts/km	6,0	4,4
P=16 cts/km	10,6	7,6
P=30 cts/km	14,5	10,9

Tabla F. 1. Costes de personal de la nueva flota de vehículos de transporte público.

- Costes kilométricos o directos para el autobús:

- Combustible: a partir de los kilómetros anuales recorridos por la nueva flota de vehículos podemos calcular el coste de combustible anual utilizando la misma formulación empleada para los costes de combustible del vehículo privado (ver anejo E). De esta forma obtenemos los siguientes resultados:

	Coste combustible anual (Millones €/año)
P=9 cts/km	0,9
P=16 cts/km	1,7
P=30 cts/km	2,3

Tabla F. 2. Costes en combustible de la nueva flota de autobuses públicos.

- Lubricantes: de la misma manera que en el caso anterior, podemos calcular el coste en lubricantes de la nueva flota de autobuses utilizando la misma formulación empleada para el vehículo privado (ver anejo E), obteniendo los siguientes resultados:

	Coste en lubricante anual (Millones €/año)
P=9 cts/km	Despreciable
P=16 cts/km	Despreciable
P=30 cts/km	Despreciable

Tabla F. 3. Costes en lubricantes de la nueva flota de autobuses públicos.

- Neumáticos: como en los casos anterior, calculamos el coste en neumáticos de la nueva flota de autobuses utilizando la misma formulación empleada en el vehículo privado (ver anejo E), obteniendo los siguientes resultados:

	Costes neumáticos anual (Millones €/año)
P=9 cts/km	0,1
P=16 cts/km	0,1
P=30 cts/km	0,2

Tabla F. 4. Costes en neumáticos de la nueva flota de autobuses públicos.

- Mantenimiento y reparaciones: para el caso del cálculo de los costes de mantenimiento y reparación de la nueva flota de autobuses, continuaremos utilizando la misma formulación empleada en el vehículo privado (ver anejo E). A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

	Coste de mantenimiento y reparación anual (Millones €/año)
P=9 cts/km	1,1
P=16 cts/km	1,9
P=30 cts/km	2,6

Tabla F. 5. Costes de mantenimiento y reparaciones de la nueva flota de autobuses públicos.

- Costes kilométricos o directos para los modos ferroviarios
  - Consumo eléctrico: el coste eléctrico depende del consumo de los diferentes modos ferroviarios. Se puede establecer un consumo promedio por vehículo y multiplicarlos por los kilómetros recorridos y el precio de la energía eléctrica. Así el coste unitario del consumo eléctrico sería:

$$C_{c\ elec} = f_{c\ elec} \cdot L_{anual} \cdot P_{kwh} \quad (\text{Rabaza \& Estrada, 2009}) \quad (\text{AF.3})$$

Donde:

$C_{c\ elec}$	Coste unitario del consumo eléctrico
$f_{c\ elec}$	Consumo eléctrico kilométrico del modo ferroviario
$P_{kwh}$	Precio de la energía eléctrica

A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

	Km año	Consumo eléctrico anual (Millones €/año)
P=9 cts/km	543.233	0,3
P=16 cts/km	943.255	0,5
P=30 cts/km	1.369.281	0,8

**Tabla F. 6. Costes en consumo eléctrico de la nueva flota ferroviaria.**

- Mantenimiento y reparaciones: el coste del mantenimiento y reparaciones se calcula del mismo modo que para los autobuses, por lo que tan sólo se necesita conocer el coste de este mantenimiento y reparación por kilómetro que en este caso es de 1,07 (Rabaza & Estrada, 2009).

	Km año	P <sub>mr</sub>	Coste de mantenimiento y reparación anual (Millones €/año)
P=9 cts/km	543.233	1,07	0,7
P=16 cts/km	943.255	1,07	1,2
P=30 cts/km	1.369.281	1,07	1,7

**Tabla F. 7 Costes de mantenimiento y reparaciones de la nueva flota ferroviaria.**

