

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Tesis Doctoral

ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS TARIFARIAS PARA LA GESTIÓN DE LA MOVILIDAD EN CARRETERAS METROPOLITANAS

Autor:

Miller Humberto Salas Rondón
Ingeniero Civil

Director de la tesis:

Dr. Francesc Robusté Antón
Catedrático de Transporte de la UPC

Co-director de la tesis:

Dr. Sergi Saurí Marchán
Profesor de Transporte de la UPC

Programa de Doctorado: Gestión del Territorio e Infraestructuras del Transporte
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona
Universidad Politécnica de Cataluña - UPC

Barcelona, Septiembre de 2008

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

7.1 Conclusiones

La modelización y análisis realizado, pueden constituir la semilla de unas guías de planificación del transporte en áreas metropolitanas congestionadas que adopten como solución la aplicación de una estrategia de tarifación para disuadir los efectos negativos que causa un exceso de flujo vehicular.

La estrategia tarifaria además de gestionar la movilidad, permite generar ingresos los cuales serían reinvertidos en mejoramiento e innovación del transporte público y mantenimiento de las carreteras. Este uso del recaudo captado reduce los efectos sobre la equidad y logra una mayor aceptabilidad pública y política.

Algunos criterios de diseño para la aplicación de una estructura tarifaria que reduzca la congestión se han propuesto para reducir los obstáculos de aceptabilidad pública y política, legalidad e institucionalidad, tecnología, privacidad y costes de implantación entre otros. Para atenuar dichos problemas, además del buen diseño del esquema tarifario, la estrategia debe estar acompañada de algunas medidas complementarias que favorezcan cierto tipo de viajes.

Al fijarse como función objetivo la maximización del bienestar social, el gobierno o la entidad reguladora debería aplicar la teoría económica fundamentada en el *coste marginal social* para que los usuarios paguen una tarifa igual al coste marginal que producen por el uso de la infraestructura. Cuantificar el valor de la tarifa óptima que internalice este coste marginal social se puede realizar a través del enfoque de *first-best* que representa la inclusión de este coste como un óptimo social total o desde el punto de vista de *second-best* que permite instaurarlo (este coste) como un óptimo pero con restricciones. Estos dos enfoques se pueden fijar a corto o a largo plazo.

Desde la noción de *second-best*, en esta tesis se desarrolla una metodología para evaluar diversas alternativas tarifarias que quieran fijarse como solución al problema de la congestión del flujo vehicular que se presenta en una red de carreteras. La evaluación se hace mediante indicadores operacionales (número de viajes o kilómetros recorridos), económicos (ingresos, coste generalizado, tarifa promedio y unitaria por kilómetro, porcentaje de variación) y sociales como la variación de bienestar social que incluye los cambios de los excedentes de usuario y productor. En función de la tipología tarifaria se

desarrolla un modelo para cada indicador, cuya formulación cuantifica la magnitud del cambio que se produce respecto a los valores iniciales de la situación sin tarifa por congestión (escenario base). La sensibilidad de los cambios que se producen en cada indicador para las múltiples opciones tarifarias es analizada en función de la elasticidad de la demanda respecto al coste generalizado y del valor del tiempo.

Para seleccionar el esquema a implantar, dentro de la metodología elaborada se presenta un análisis multicriterio fundamentado en una técnica de evaluación de alternativas. La cuestión es determinar el vector propio de la matriz de comparación de las múltiples opciones tarifarias a considerar. Para ello es necesario controlar la consistencia de la matriz a través de los pesos relativos acordados para los objetivos establecidos. En este caso se le ha dado gran importancia a la ganancia de bienestar social alcanzada al reducir los costes de congestión.

Cinco estructuras tarifarias fueron analizadas. Dos simples: (i) tarifa plana y (ii) tarifa kilométrica lineal; y tres complejas: (iii) tarifa kilométrica cóncava, (iv) tarifa de acceso más kilométrica lineal y (v) cordón más kilométrica lineal. Las estructuras simples son las que regularmente se aplican puesto que son fáciles de comprender por parte de los usuarios y sencillas de establecer por parte del gestor. No obstante, dentro de sus debilidades se demuestra que la tarifa plana no valora de forma equitativa los viajes de gran recorrido y la tarifa kilométrica fomenta los viajes de corta distancia que son generadores de congestión. Respecto a la tarifa kilométrica cóncava se ha planteado para favorecer a los viajeros frecuentes que recorren grandes distancias. Los parámetros de la tarifa se calibran de acuerdo al descuento que se quiera aplicar según un cierto número de kilómetros. Las estructuras (iii) y (iv) se diseñan para equilibrar las debilidades y fortalezas de las estructuras simples. Además, el esquema (iv) presenta la ventaja de amoldarse a la topología de la red de carreteras existente bien sea radial o no.

Al simular la instauración de cada uno de los esquemas tarifarios analizados sobre la red de vías de gran capacidad del Área Metropolitana de Barcelona se concluye que:

- Si las tarifas son nulas se conservan los valores iniciales del escenario base, los cuales son negativos tanto para el excedente del productor como para la variación del bienestar social debido a los ingresos iniciales que provienen de la financiación de algunos tramos de autopistas. A medida que se incrementan las tarifas se refleja la ganancia estimada en el excedente del productor así como la pérdida creciente en el excedente de usuario. Al sumar algebraicamente este par de excedentes para cada nivel de peaje y considerando una perspectiva unimodal de transporte (coche) se estipula el valor máximo de la variación del bienestar social. Este máximo señala el porcentaje óptimo de reducción de la demanda que permite la eficiencia del sistema;
- Dentro de las consecuencias producidas por una tarifa plana sobre algunas rutas entre pares O-D, se halla que es coercitiva cuando las distancias recorridas son inferiores a los 15 km pero menos disuasoria cuando las longitudes del viaje son largas. Por otro lado, al aplicar una tarifa basada en la distancia resulta que es restrictiva cuando las distancias de viaje superan los 15 km. Sin embargo, atrae viajes de corto recorrido que son los que incentivan la formación de colas;

- Al comparar los resultados entre las estructuras tarifarias kilométrica lineal y cóncava, resulta que esta última requiere una tarifa unitaria mayor para reducir la misma cantidad de tráfico. Pero los efectos sobre el excedente de usuario y la cantidad del recaudo bruto obtenido son menores;
 - La instauración de una estructura compuesta por una tarifa de acceso más una tarifa kilométrica lineal sobre algunas rutas de mínimo coste produce que: (i) al incrementar la tarifa de acceso a la autopista y dejar una tarifa kilométrica baja, se evite una mayor cantidad de viajes de corto recorrido pero se benefician los viajes con trayectos largos. (ii) cuando se establece una tarifa de acceso baja y se aumenta la tarifa por kilómetro habría gran permisividad con los viajes cortos y se castigaría los viajes de largo recorrido. Este segundo caso que fomenta los viajes cortos, genera una mayor cantidad de recaudo bruto pero a cambio ocasiona mayores pérdidas de excedente de usuario para la misma cantidad de tráfico evitado;
 - Al fijarse un esquema mixto: tarifa plana más una tarifa kilométrica lineal se tiene la ventaja que se adapta muy bien a la topología viaria existente. Los efectos sobre algunas rutas de mínimo coste entre pares O-D son: (i) se evitan rápidamente los viajes con trayectos cortos y en la zona externa al cordón resultan beneficiados los viajes de grandes distancias al cobrarse una tarifa reducida por kilómetro para toda la red y una tarifa plana significativa solamente en el área que cubre el cordón incluido su perímetro. (ii) Si la tarifa plana es baja en el área del cordón y la tarifa según la distancia es alta fuera del cordón, provocaría una gran disuasión de todos los viajes que tienen como origen o destino la ciudad de Barcelona. En este caso habría un control puntual sobre los viajes de corta distancia, captando una mayor cantidad de recaudo bruto y notables ahorros en los costes sociales de congestión, a cambio de pérdidas superiores en el excedente de usuario;
 - El análisis de sensibilidad hecho para todas las opciones tarifarias muestran que cuanto más se valore el tiempo mayor será el nivel de la tarifa que se requiera para disuadir la misma cantidad de tráfico y por ende, las tarifas promedio y unitaria, el recaudo final, la variación del excedente de usuario total y la variación neta del bienestar social son superiores. Exceptuando la variación total del bienestar social los mismos efectos se fomentan cuanto más inelástica se asuma la demanda. Dicha variación permanece prácticamente igual cuando se ocasionan reducciones bajas de la demanda (5%), pero cuando la disminución de veh-km es media (10%) o alta (15%), la magnitud del cambio total en el bienestar es menor cuanto más inelástica sea la demanda;
 - El punto anterior permite establecer que al asumir un error en la valoración de la elasticidad o del valor del tiempo, la cuantificación de la(s) tarifa(s) no será fiable y en consecuencia, la estimación de la magnitud de los diversos indicadores que dependen de estas tarifas sería erróneas;
 - Respecto al ratio entre el bienestar social total y la pérdida de excedente de usuario se encuentra que su valor se reduce cuanto más inelástica sea la demanda para una misma disminución de tráfico. No obstante, esta relación decrece al reducir un mayor número de veh-km;
 - Los valores más altos de la tarifa media que pagaría cada vehículo se consiguen al aplicarse una estructura kilométrica lineal, seguida por la estructura kilométrica cóncava. Mientras que las mayores tarifas unitarias medias se
-

consiguen con la estructura kilométrica cóncava y los dos sistemas complejos de tarificación. Los menores valores de los dos tipos de tarifas se consiguen con la estructura plana;

- La metodología desarrollada tiene en cuenta el cobro del peaje inicial por motivos de financiación en algunos tramos de autopistas. Si las tarifas para gestionar la demanda son bajas, los ingresos que se captan no son suficientes para cubrir el recaudo actual que perciben las concesionarias. Las estructuras basadas en la distancia, son las ideales para producir los mayores recaudos brutos y los menores con una estructura plana;
- A medida que se disuade la demanda se va obteniendo una ganancia de bienestar social hasta llegar a un valor máximo. Después de este punto, la eficiencia óptima empieza a perderse por una desproporcionada reducción del tráfico (traducida en desaprovechamiento de la capacidad viaria). La magnitud de este máximo depende de la cantidad y tipo de viajes que se disuaden, de la valoración que se le dé al tiempo (relacionado con el nivel de renta de los viajeros) y del esquema tarifario que se aplique;
- El ratio entre variación de bienestar social y la pérdida de excedente de usuario es mayor cuando se implanta una tarifa plana. Esto indica que en las demás estructuras tarifarias pesa mucho más el recaudo bruto a colectar, lo cual es un punto importante en el momento de elección del esquema tarifario dado que se requiere reinvertir estos ingresos en infraestructura o en mejoramiento del transporte público;
- Una tarifa plana que controle los viajes cortos en la zona del cordón unido a una tarifa kilométrica fuera del cordón que valore económicamente los viajes de largo recorrido, es la estructura tarifaria seleccionada para gestionar la movilidad en el AMB.

7.2 Líneas de investigación

En síntesis, se ha desarrollado un trabajo interesante y creativo que abarca múltiples aspectos, algunos de los cuales quedan abiertos para ser desarrollados en investigaciones futuras.

- Incorporar diferentes categorías de usuarios según el nivel de renta o según tipo de viaje;
- Estimación de todos los parámetros utilizados empleando modelos econométricos;
- Ampliar la modelación de la variación del bienestar social incorporando el efecto de cambio de modo de los usuarios;
- Considerar una función de demanda más general (por ejemplo trans-log, exponencial, etc.), o un modelo combinado de distribución y asignación conjunta;
- Considerar funciones de coste más generales, con nuevas variables explicativas;
- Usar matriz de viajes proveniente de una encuesta masiva, de interceptación o en hogares;
- Profundizar en los efectos distribucionales;

- Considerar el impacto de los posibles usos del recaudo que se obtenga, e incluirlos en el cálculo de los efectos distribucionales;
 - Comparar la magnitud del excedente de bienestar neto con el total de los efectos distribucionales;
 - Identificar otro tipo de funciones basadas en la distancia que apliquen descuentos a viajeros frecuentes;
 - Emplear un procedimiento heurístico para determinar de forma óptima los parámetros de la ecuación general de una estructura tarifaria combinada. Lo anterior para medir el comportamiento de un indicador en función de las tarifas.
-

ANEXOS

ANEXO 1

COSTES EXTERNOS DEL TRANSPORTE POR CARRETERA

A1.1 Introducción

Los costes externos resultan de la cuantificación de las externalidades negativas generadas por el transporte, (congestión, accidentes, efectos medioambientales, daños en la infraestructura, efectos barrera, estrés, etc.), y según el Libro Blanco (1998) de la CE, son costes no pagados por el usuario de un bien o servicio (en este caso una infraestructura). No reconocer tales costes conlleva al uso excesivo del bien o servicio.

En su momento, el Libro Verde (1995) de la CE, cuantificó los costes producidos por las externalidades negativas en 250.000 millones de euros, el 90% de ellos estaba vinculado al tráfico por carretera. La internalización de dichas externalidades, permitiría economizar entre 28.000 y 78.000 millones de euros al reducir la congestión del tráfico y el número de accidentes, y al disminuir las emisiones de CO₂ en un 12% como media.

Cuantificar en términos monetarios los efectos externos del transporte no es nada fácil y resulta complejo en la práctica, por lo tanto es necesario determinar para cada modo si los niveles de producción y los precios son los apropiados, o si el reparto modal es el conveniente socialmente cuando se introducen dichos efectos.

A1.2 Daños en la infraestructura

Una política de infraestructuras que maximice el bienestar social debe tener en cuenta que los vehículos adicionales afectan la necesidad de mantenimiento, reparación, reconstrucción y operación de la infraestructura; por ende, estos efectos se deben internalizar a través de una estrategia tarifaria. Generalmente las investigaciones apuntan a obtener una tarifa óptima que reduzca la congestión y/o los impactos al medioambiente y se presta menos atención a estimar cuáles son los costes marginales por uso de infraestructura, Link y Nilsson (2005).

Diversos países de Europa han hecho estudios para cuantificar el coste total de la infraestructura y los ha asignado a los diferentes usuarios o tipos de vehículos. Algunos de estos estudios han intentado distinguir del coste total cuáles son costes fijos y cuáles son variables, para luego establecer un *top-down* en porcentaje de costes variables a distintas categorías de vehículos basados en juicios empíricos, de ingeniería y expertos.

Habitualmente, la clasificación de los costes totales de infraestructura se hace diferenciando los costes de capital de los costes de operación, como se muestra en la tabla A1.1.

Tabla A1.1. Métodos actuales para el cálculo de costes de infraestructura en diferentes países Europeos. (Fuente: Link y Nilsson, 2005).

País	Metodología empleada
Austria	Análisis de regresión
Dinamarca	Diferenciación entre costes de capital y costes de operación dentro de: Costes fijos Costes variables en función de parámetros como: veh-km, veh-ocupación, peso del vehículo, peso patrón y factores de ocupación por tipo de vehículo
Francia	Diferenciación entre gastos fijos y variables, empleando factores: veh-km; peso-veh-km; eje patrón-veh-km.
Alemania	Diferenciación entre costes marginales y costes de capacidad empleando: 1. Costes marginales por factores daño de * veh-km; 2. Costes de capacidad por factores (dependientes de la velocidad) * veh-km.
Italia	Diferenciación entre gastos marginales y de capacidad empleando: veh-km; eje-peso-km, eje patrón-km.
Países Bajos	Diferenciación de gastos de inversión y de operación en diferentes categorías, empleando: veh-km; veh ligero-km, peso de eje-km.
Finlandia	Diferenciación entre gastos fijos y variables, empleando factores: veh-km; peso del vehículo.
Suecia	Diferenciación entre gastos fijos y variables, empleando funciones de gasto dependientes de: veh-km; veh ligero-km; factores de * veh-km.
Suiza	Asignación de funciones de costes para: 1. Nuevas inversiones (estimadas en porcentaje por tipo de vía) empleando funciones dependientes del peso y sus correspondientes factores; 2. Inversiones en mantenimiento del pavimento empleando funciones dependientes del peso por carga del eje- veh-km; 3. Capacidad: 80% por longitud veh* veh-km y 20% por veh-km; 4. Costes actuales por veh-km.
Reino Unido	Asignación de funciones de costes para: 1. Gastos de capital: 15% por Peso Bruto del veh-km y 85% por veh ligero-km; 2. Gastos de mantenimiento diferenciados por tipo de gasto y empleando diferentes factores; 3. Control y mantenimiento del tráfico por veh-km.

Para estimar la función de costes de infraestructura generalmente se utilizan dos enfoques:

A1.2.1 Enfoque econométrico

Este método emplea los gastos que se ejecutan en mantenimiento, reparación, y operación de la infraestructura en un tramo determinado. Para ello se usa una función de costes translog, que impone pocas restricciones sobre la tecnología de producción subyacente, permite cálculos simples de sustitución de elasticidades y contiene todas las propiedades relevantes de la teoría de producción neoclásica tales como el factor de sustitución, economías de escala y cambios tecnológicos. La función de costes translog describe la relación entre el coste C , el vector m -dimensional de niveles *output* Y y el vector n -dimensional de precios *input* W , a través de la función logarítmica A1.1.

Esta forma de analizar cómo el coste, los *output*, los factores de producción y los precios *input* varían, se aplica también para analizar la conducta del gasto en mantenimiento, reparación, reconstrucción y operación de la infraestructura. Sin embargo, se requiere de otros factores importantes como el clima, el número de años que han pasado después de la última rehabilitación de la autopista, la calidad inicial de construcción de la infraestructura, etc., que se estudian desde la ingeniería.

$$\begin{aligned} \ln C = & \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i \ln Y_i + \sum_{j=1}^n b_j \ln W_j \\ & + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m a_{ij} (\ln Y_i \ln Y_j) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} (\ln W_i \ln W_j) \\ & + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n d_{ik} (\ln Y_i \ln W_k) \end{aligned} \quad (\text{A1.1})$$

A1.2.2 Enfoque desde la ingeniería

Con este enfoque se utiliza la relación funcional entre las mediciones de los daños de la infraestructura y factores de impacto como el clima, estructura de pavimento, uso de la infraestructura, etc., evaluando esta relación en términos monetarios. El más conocido de estos estudios fue el ensayo que entre 1956 y 1960 realizó la AASHO (*American Association of State Highway Officials*) para carreteras, donde empleó diversos tipos de pistas para que circularan diferentes clases de camiones y así obtener una relación entre el daño a la infraestructura y el peso de los ejes. Esta relación indicaba que el daño en la carretera es proporcional a la cuarta potencia del peso del eje, es decir, si se duplica el peso en el eje, el daño que se causa en el pavimento se incrementa en un factor de 16. Luego al asumir que el coste de la carretera es proporcional al daño de la misma, esta función de daños se puede trasladar a una función de costes.

Sin embargo, los costes para la renovación de infraestructura (tales como repavimentación y rehabilitación) son difíciles de analizar basados en datos empíricos, puesto que el tiempo entre una medición y otra es bastante amplio (superior a 10 años), de ahí que sea dificultoso ver cómo estos datos varían con el tráfico. Dada esta dificultad, Lindberg (2002), emplea el hecho de que el número de ejes patrón que la carretera puede acomodar es una función del número actual de ejes y no del volumen de tráfico pronosticado. Luego, el pavimento se renueva cuando la carretera presente un deterioro y alcanza cierto número de ejes. Añadiendo o quitando vehículos al pronóstico inicial se afecta la fecha de una reinversión y es ahí, donde se asocia un coste marginal con las variaciones del volumen de tráfico.

El modelo de Lindberg (2002), señala a T como la vida útil del pavimento (número de años entre rehabilitaciones del pavimento) y es una función del número (constante) de ejes patrón anuales Q que usan la carretera y de la resistencia a la deformación del pavimento, donde Θ indica el número de ejes patrón que el pavimento puede soportar y m muestra el factor de deterioro dependiente del clima. Este modelo se representa como:

$$T = \left[\frac{\Theta(Q)}{Q} \right] e^{-mT} \quad (\text{A1.2})$$

Si cada recubrimiento tiene un coste de Cc y la primera sobrecapa se realiza en el año cero, entonces, el valor presente de un número infinito de sobrecapas se calcula mediante la expresión A1.3 si se considera el coste desde la perspectiva de la sobrecarpeta inicial ($VP Cc_0$) y mediante la expresión A1.4 si la perspectiva tomada es que la carretera tiene t cantidad de años ($VP Cc_t$), donde r es la tasa de descuento relevante.

$$VP Cc_0 = Cc(1 + e^{-rT} + e^{-r2T} + \dots + e^{-rnT}); \quad \lim_{n \rightarrow \infty} VP Cc_0 = \frac{Cc}{(1 - e^{-rT})} \quad (\text{A1.3})$$

$$VP Cc_t = e^{-r(T-t)} \frac{Cc}{(1 - e^{-rT})} \quad (\text{A1.4})$$

Para estudiar el efecto del tráfico anual sobre el coste, las propiedades del valor presente anualizado de un promedio de carreteras ($NACc_{prom}$) se expresa mediante la ecuación A1.5, donde $VP Cc_{prom}$ corresponde al promedio de todas las carreteras de diferentes épocas sin tener en cuenta el efecto del clima.

$$NACc_{prom} = rVP Cc_{prom} = Cc/T \quad (\text{A1.5})$$

El coste marginal que se origina por renovar el pavimento en periodos de tiempo cortos debido a las altas cargas del tráfico se obtiene diferenciando el valor presente anualizado de la carretera con respecto al volumen de tráfico anual. Empleando la elasticidad de deterioro ε (que representa el cambio de vida útil del pavimento debido a las altas cargas del tráfico, ecuación A1.6) y la definición de coste medio $CMe = Cc/T = Cc/QT$, el coste marginal para un promedio de carreteras CMa_{prom} se relaciona con el coste medio total, tal y como se muestra en la ecuación A1.7.

$$\varepsilon = \frac{\partial T}{\partial Q} \frac{Q}{T} \quad (\text{A1.6})$$

$$CMa_{prom} = -\varepsilon CMe \quad (\text{A1.7})$$

Esta ecuación A1.7 muestra que el coste medio es igual al coste marginal si (a) no hay efecto del clima y (b) si el número de ejes patrón que resiste la estructura del pavimento es constante.

En contraste con el enfoque econométrico que refleja la conducta del gasto *actual*, el coste marginal derivado desde el enfoque de la ingeniería refleja la *necesidad* de mantenimiento y rehabilitación.

La guía de diseño de pavimentos de la AASHTO convierte los distintos tipos de ejes en ejes estándar de 8.2KN usando factores de equivalencia de carga (FEC). Los FEC se basan en la pérdida del actual Índice de Serviciabilidad (ISo).

El Departamento de Transporte de Michigan (MDOT), emplea los parámetros del ahuellamiento AH , Índice de envejecimiento IE y el Índice de Calidad de la Carretera ICC para medir el desempeño de un pavimento flexible en función del número de vehículos pesados que circulan diariamente.

El ahuellamiento AH es el principal síntoma de daño en los pavimentos flexibles relacionado con las cargas del tráfico. Consiste en una deformación permanente que se va formando paralela al eje de la vía y empieza en cero y se va incrementando con el número de repeticiones de las cargas de los vehículos pesados. El MDOT considera un límite de ahuellamiento de 12 mm como la frontera entre un pavimento en buenas condiciones y otro de pobres condiciones. Una forma de medir el ahuellamiento es a través de la siguiente expresión:

$$AH = 0.035 + 0.984(C_{13}) + 0.03(B + C) + 0.0007(m) \quad (A1.8)$$

Donde: C_{13} es el número de camiones de clase 13 en un carril por día en miles, B es el número de camiones clases 8 al 12 en miles, C es el número de camiones clases 4 al 7 en miles y m es el número de meses que dura el ensayo.

El Índice de envejecimiento IE es una medida del desempeño del pavimento dentro de un sistema de gestión. A través de la observación y la valoración de las condiciones de la superficie del pavimento, el IE se determina como una medida del envejecimiento (relacionada con la carga) y se emplea para desarrollar un mantenimiento preventivo y para rehabilitación/reconstrucción. El IE se determina visualmente cuantificando en unidades métricas la severidad y la extensión de las grietas. La escala empieza en cero cuando el pavimento es nuevo y se incrementa (sin límite) cuando las condiciones son peores. El MDOT clasifica el IE en tres niveles: bajo ($IE < 20$), medio ($20 < IE < 40$) y alto ($IE > 40$). Un pavimento con un $IE = 50$ se considera envejecido y se debe rehabilitar o reconstruir.

A1.3 Efectos al medioambiente

Los costes medioambientales que ocasiona el transporte por carretera cubren un amplio rango de diversos daños (emisiones de ruido y distintos tipos de polución atmosférica) sobre la salud de las personas, materiales, ecosistemas, flora y fauna. Dichos costes varían considerablemente con la tecnología del vehículo y las características del lugar (o ruta) y además, la suma del coste marginal medioambiental no es igual al coste total medioambiental si los costes marginales no son iguales a los costes medios, así como

los costes totales basados en un tipo de vehículo (o características del lugar o ruta) no equivale a calcular el coste marginal externo, Bickel et al. (2005).

A1.3.1 Contaminación atmosférica

La combustión de grandes cantidades de combustibles fósiles (industrialización y motorización) durante más de un siglo ha hecho que los niveles de concentración de dióxido carbono CO₂ sea uno de los causantes del cambio climático. El CO₂ atrapa el calor del sol aumentando la temperatura en la superficie de la tierra, creando así el efecto invernadero. Conjuntamente con el dióxido carbono CO₂ existen otro tipo de gases que contribuyen a aumentar el calentamiento global como por ejemplo, el metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), ozono troposférico o clorofluorocarbonados (CFC).

Según el Inventario de emisiones 2002 del Ministerio de Medio Ambiente Español, el transporte genera el 32,1% del conjunto de emisiones de CO₂, en donde el modo carretera representa el 93,9%. En cuanto al metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), la carretera concentra el 98,4% y el 96,6% respectivamente de estas emisiones. Además, la circulación de los vehículos supone el lanzamiento a la atmósfera de más de un millar de diferentes sustancias químicas, como son los óxidos de nitrógeno -NO_x (contribuye indirectamente al efecto invernadero y de forma directa a la lluvia ácida), el monóxido de carbono -CO (dificulta la absorción de oxígeno), los óxidos de azufre -SO_x (principal causante de la lluvia ácida), metales pesados y los Compuestos Orgánicos Volátiles -COV (que generan cáncer, enfermedades cardiovasculares y respiratorias), en que el 98,9% del conjunto de las emisiones de CO y del 88,5% en el caso de los NO_x son derivados de las emisiones del tráfico rodado. La presencia de ozono O₃, cada vez más en las áreas metropolitanas puede dar lugar a inflamación pulmonar, disminución de la capacidad respiratoria, y menor resistencia a las enfermedades pulmonares.

Las emisiones procedentes del creciente tráfico rodado deterioran la calidad del aire, especialmente en las áreas urbanas, afectando la salud de sus habitantes; la población asentada en las ciudades está expuesta a niveles excesivos de contaminantes. De tal forma que los expertos afirman que la contaminación atmosférica genera una mayor tasa de mortalidad que los accidentes de tráfico, afectando especialmente a niños y ancianos.

Para mitigar la contaminación atmosférica ocasionada por los vehículos de transporte, los países desarrollados y algunos en desarrollo, vienen tomando medidas que incluyen al transporte urbano e interurbano. Entre estas medidas se destacan la aplicación de normas a los combustibles y a la calidad del aire, estableciéndose valores límite aplicables a las emisiones de los gases de escape de los vehículos particulares y comerciales y otorgándose incentivos fiscales a aquellos vehículos que respeten dichos valores.

Teniendo en cuenta que el cambio climático global es causado por la liberación de los gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, el Protocolo de Kyoto, adoptado por 159 países signatarios de la Convención Marco sobre Cambio Climático, estableció límites sobre las emisiones de los GEI en 39 países industrializados y economías de transición. En Europa se optó por un valor medio de 20€/ton CO₂ emitida para evaluar

el coste que producen la emisiones de CO₂, dado que la escala del daño global causado por este tipo de emisiones se desconoce cómo y dónde se producen, Bickel et al. (2003).

La contaminación atmosférica causada por el tráfico es difícil de cuantificar debido a que se necesita un modelo para las emisiones y otro modelo para su dispersión, además, se dificulta desligar los resultados entre periodos con y sin congestión. El estudio INFRAS/IWW (2000), ha elaborado una metodología para determinar los costes de contaminación atmosférica siguiendo dos métodos: el primero calcula los costes de prevención y el segundo calcula los costes de los daños causados. Los costes de contaminación del aire incluye el coste ocasionado por las emisiones de NO_x y las partículas sólidas (VOC), de SO₂ y CO₂ sin tener en cuenta los daños producidos por los hidrocarburos (HC).

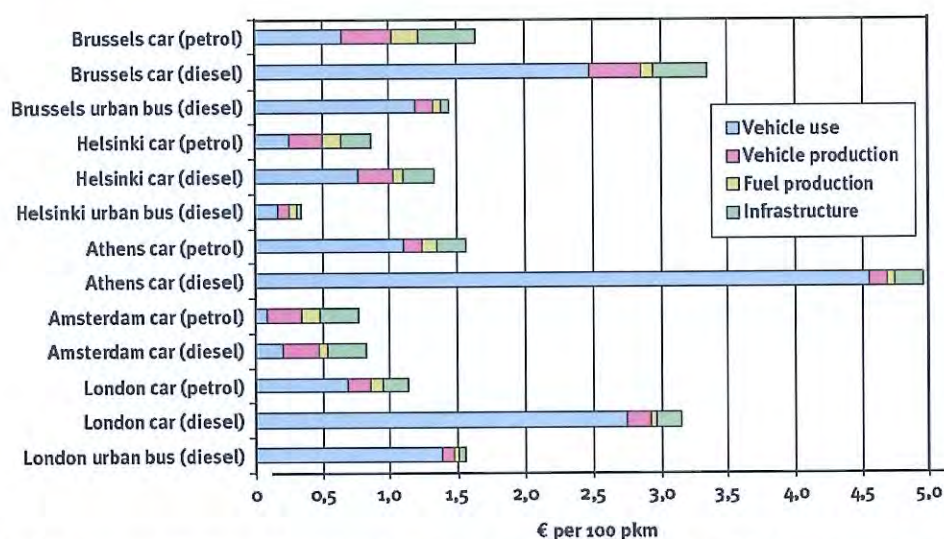


Fig. A1.1. Costes debidos a la contaminación atmosférica producidos por el transporte urbano de pasajeros. (Fuente: ExternE, 2003).

La figura A1.1 ilustra los daños en costes que produce el transporte urbano de pasajeros por carretera en diversas áreas urbanas, en donde los vehículos cumplen con las emisiones tipo EURO II. Se nota cómo los costes por pasajero kilómetro de los vehículos que funcionan con gasolina son menores comparados con los que usan diesel, emitiendo menos partículas y causando menos daño a la salud de las personas. Inclusive, al comparar los costes por pasajero kilómetro de los buses, estos resultan inferiores que los de aquellos coches que usan diesel debido al gran número de ocupantes, dichos resultados fueron publicados para la CE por ExternE (2003).

Empleando el enfoque impacto en una ruta, Bickel et al. (2003), estiman el coste total que producen las emisiones basados en datos espaciales desagregados en toda la red de carreteras. Tal enfoque comprende los siguientes pasos: cálculo de emisiones, modelo de dispersión y conversión química, cálculo de impactos físicos y cuantificación monetaria de esos impactos. Dada la sensibilidad del coste al número de receptores cerca de la fuente de emisión, la información espacial es básica para medir la exposición a las emisiones que captan cada uno de los receptores. En el caso ideal, las emisiones se cuantifican empleando toda la red de carreteras junto con los datos del tráfico en

circulación como por ejemplo, tipo y número de vehículos, velocidad media y los factores relevantes a la emisión generada en esa ubicación.

ALG (2003), propone una metodología para la evaluación de los costes de polución atmosférica a partir de las bases de datos de BeTa (*the Benefits Table database*) *Estimates of the marginal external costs of air pollution in Europe*, proyecto impulsado por la Comisión Europea DG Environment (2002), el estudio INFRAS/IWW (2000) y los proyectos europeos impulsados por la Comisión: ExternE (1998) i MEET (1999). En dicha metodología se tiene en cuenta los costes de las enfermedades (se han diferenciado 13 tipos de enfermedades) derivadas e imputables a la contaminación atmosférica y el coste de los daños que se generan en las cosechas y los materiales.

$$C_p^{i,b} = \sum_{j=1}^{13} E_{e,j}^b P_{e,j}^b C_{e,j} + C_{mc} \sum_{k=1}^n T_k \quad (A1.9)$$

Donde: $C_p^{i,b}$ es el coste total de la polución atmosférica, i es el modo de transporte y b el ámbito, $E_{e,j}^b$ es el número de enfermos totales de la enfermedad j , $P_{e,j}^b$ probabilidad de que un enfermo de la enfermedad j producida por contaminación atmosférica sea debida al modo de transporte i en el ámbito b , $C_{e,j}$ es el coste unitario de la enfermedad j debida a la contaminación atmosférica, C_{mc} es el coste unitario de los daños que se generan en los materiales y las cosechas (costes externos por tonelada de emisión), T_k es la emisión del tipo de vehículo k (observaciones de n vehículos del modo i).

Para la implantación del cordón en Londres, los indicadores ambientales seleccionados fueron el consumo de combustible, la emisión de CO_2 y CO . Se basaron en el trabajo CORINAIR Work Group, para obtener los parámetros y la fórmula aplicada en cada arco de toda la red.

$$f = \{[718(v^{-0.694})(1 + 0.35x)y(1 - z)co] + [57yz]co + [157.5y]vc + [330y]bus\} / 1 * 10^4 \quad (A1.10)$$

Donde: f es el consumo de combustible (toneladas), v la velocidad en el arco (km/h), x es la proporción de consumo de combustible para los veh-km en los primeros 4 km del viaje, y factor de eficiencia del combustible, z proporción de coches con diesel, co son la cantidad de veh-km de coches en el enlace, vc son la cantidad de veh-km de vehículos comerciales en el enlace, bus son la cantidad de veh-km de buses en el enlace. Los factores 718, 57 y 300 se tomaron directamente de CORINAIR. Los valores de x , y y z fueron dados por el DoT para los años 1991 y 2011.

Las emisiones de CO_2 se estimaron del consumo de combustible: $CO_2 = 3,1f$

Para las emisiones de CO , la ecuación fue:

$$CO = \{[214(v^{-0.876})(1 - 0,8c)(1 + 2x)(1 - z)co] + [z]co + [3.91]vc + [6.6]bus\} / 1 * 10^6 \quad (A1.11)$$

Donde: CO son las emisiones de monóxido de carbono (toneladas), v la velocidad en el arco (km/h), c es la proporción de coches a gasolina con convertidores catalíticos, x es la proporción de consumo de combustible para los veh-km en los primeros 4 km del viaje, z proporción de coches con diesel, co son la cantidad de veh-km de coches en el enlace, vc son la cantidad de veh-km de vehículos comerciales en el enlace, bus son la cantidad de veh-km de buses en el enlace.

En Estados Unidos se usa el programa MOBILE6 para estimar las emisiones de hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NOx) y otros gases producidos por los diferentes tipos de vehículos. Dichas estimaciones dependen de varias condiciones como la velocidad media del vehículo, del tipo de combustible, temperatura, humedad del medio ambiente, etc.

De acuerdo con los resultados de MOBILE6 se muestra que el factor de emisión de CO se incrementa cuando disminuye el nivel de servicio. Esta conclusión se atribuye al aumento de la densidad vehicular y la duración de las colas (causa y efecto) por ejemplo, cuando se pasa de un NS D a un NS F. En condiciones de flujo libre (NS A) en el que se presentan altas velocidades, las emisiones empiezan a incrementarse levemente después de los 56 km/h, siendo mayor la emisión cuanto mayor sea la velocidad, tal como se muestra en la figura A1.2.

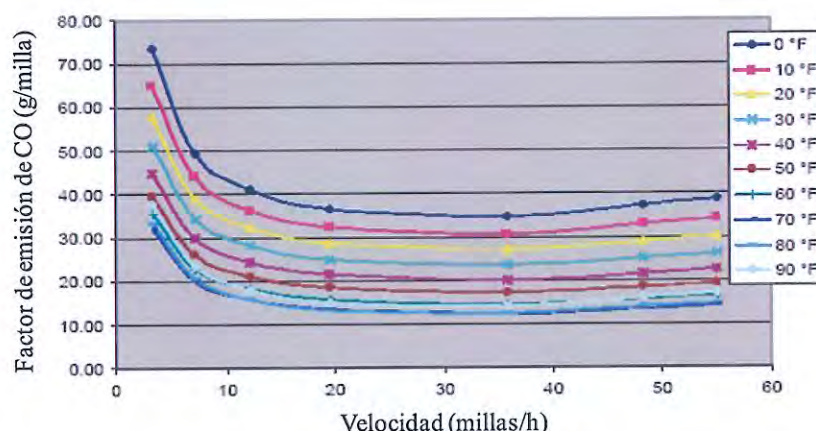


Fig. A1.2. Factores de emisión de CO vs. Velocidad media. (Fuente: Carr, 2004).

A1.3.2 Ruido

Según la Organización Mundial de la Salud (1999), la contaminación acústica sigue en aumento y produce un número cada vez mayor de reclamos por parte de la población. El sonido es una percepción sensorial y el complejo patrón de ondas sonoras se denomina ruido, música, habla, etc. Generalmente, el ruido se define como un sonido no deseado, ya que físicamente, no existe ninguna distinción entre ambos.

Todas las medidas consideran la frecuencia del sonido, los niveles generales de presión sonora y la variación de esos niveles con el tiempo. Debido a que el rango de presión sonora que puede detectar el hombre es muy amplio, se mide en una escala logarítmica

cuya unidad es el decibel. Sin embargo, nuestros sistemas auditivos no perciben todas las frecuencias sonoras y por ello, se usan diversos tipos de filtros o medidores de frecuencias para determinarlas cuando se produce un ruido ambiental específico. La ponderación A es la más usada y mide las frecuencias inferiores que son menos importantes que las frecuencias medias y altas. Tiene como objetivo estimar la respuesta de nuestro sistema auditivo a la frecuencia, y se expresa en dB(A).

En la Unión Europea, alrededor del 40% de la población está expuesta al ruido del tránsito con un nivel equivalente de presión sonora que excede 55 dB(A) en el día y el 20% está expuesta a más de 65 dB(A). Si se considera la exposición total al ruido del tránsito, se puede calcular que, aproximadamente la mitad de los europeos vive en zonas de gran contaminación sonora. Más del 30% de la población están expuestos durante la noche a niveles de presión sonora que exceden 55 dB(A) y que les trastornan el sueño. El problema también es grave en ciudades de países en desarrollo y se debe principalmente al tránsito. Las carreteras más transitadas registran niveles de presión sonora de 75 a 80 dB(A) durante las 24 horas. La tabla A1.2 muestra los niveles de ruido que emiten los diferentes tipos de vehículos.

Tabla A1.2. Niveles de ruido que emiten los diferentes tipos de vehículos. (Fuente: OMS. Guías para el ruido urbano. 1999).

Tipo de vehículo	Nivel de presión sonora
Motocicleta (2 ruedas)	82dB(A)
Coche	85dB(A)
Camión	92dB(A)

Son numerosos los efectos que el ruido ocasiona sobre las personas, entre los que se destacan los problemas de audición, interferencias en la comunicación oral, trastornos en el sueño y descanso, pérdida de atención, concentración y rendimiento, efectos psicológicos y fisiológicos, malestar. Estos efectos son mayores en ciertos grupos de personas considerados especialmente sensibles al ruido entre los que se encuentran los niños, ancianos, personas enfermas, personas con dificultades de visión y audición, y los fetos. La escala de ruidos que se ilustra en la figura A1.3 representa los efectos sobre la salud de las personas en distintos umbrales auditivos.

Diversos estudios demuestran que los niveles de ruido preocupante (65-70 dB(A)) comienzan a manifestarse en las proximidades de las infraestructuras viarias a partir de intensidades diarias de tráfico superior a los 10.000 vehículos/día. La estimación directa del coste provocado por el ruido debería tener en cuenta el nivel de ruido inducido por los vehículos durante su operación, el área de afectación, la posibilidad de que una persona ubicada en esta zona enfermarse y los costes asociados a dicha enfermedad. Estos costes habrían de ser incrementados en la posible depreciación del valor inmobiliario de la zona.

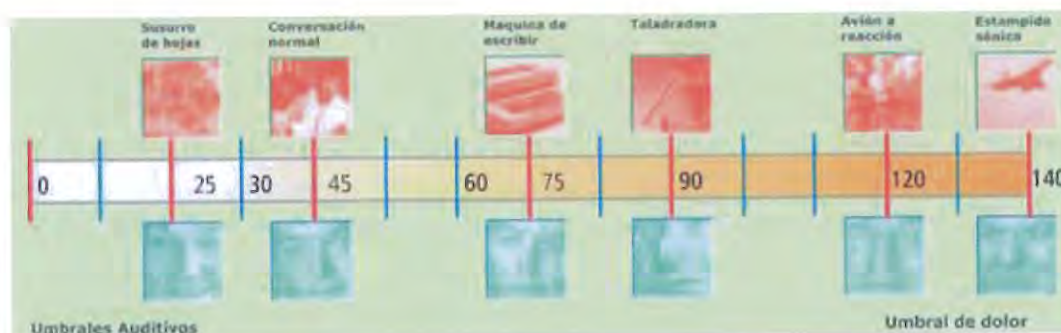


Fig. A1.3. Efectos sobre las personas de los distintos umbrales auditivos. (Fuente: Costes externos del transporte en la Comunidad Autónoma del País Vasco. 2005).

Dado que el ruido está focalizado, el coste marginal ocasionado por la exposición al ruido se determina principalmente por:

- La distribución y distancia de las personas expuestas desde la fuente;
- El nivel de ruido existente, generalmente producido por el tráfico (tipo y número de vehículos, velocidad, etc.);
- La hora del día (el coste marginal es más alto en las horas nocturnas que en las diurnas, con una diferencia de hasta un factor de 3).

La metodología para la cuantificación del ruido considera las características de su propagación y funciones exposición-respuesta. La tabla A1.3 ilustra la variación en costes del ruido cuantificado en el estudio UNITE para zonas urbanas.

Tabla A1.3. Costes (c€/veh-km) debidos al ruido en carreteras urbanas según tipo de vehículo. (Fuente: Bickel et al. 2005).

Ciudad	Coches particulares		Vehículos pesados	
	Día	Noche	Día	Noche
Helsinki	0,22	0,53	-	-
Stuttgart	1,50	4,50	25,75	78,25
Berlín	0,47	1,45	7,67	23,33

Los costes del ruido podrían estimarse a través de encuestas de preferencias declaradas (disponibilidad a pagar de la gente con tal de no sufrir estas molestias y/o enfermedades); una aproximación de estos valores la podría ofrecer una metodología de precios hedónicos, como la depreciación inmobiliaria en el mercado de ciertos inmuebles afectados por esta problemática. De acuerdo con estos parámetros ALG (2003), propone la siguiente formulación para la cuantificación del coste del ruido:

$$\text{Coste de ruido} = C_{\text{personas afectadas}} + C_{\text{reducción precio del suelo}} + C_{\text{mrr}} \quad (\text{A1.12})$$

Donde:

$$C_{\text{personas afectadas}} = P_{a1}^{i,b} C_{a1} + P_{a2}^{i,b} C_{a2} \quad \text{y} \quad C_{\text{reducción precio del suelo}} = S_{m^2}^{i,b} C_{m^2} \quad (\text{A1.12a})$$

Tal que, $P_{a1}^{i,b}$, $P_{a2}^{i,b}$ son el número de personas expuestas a una contaminación acústica entre 55 y 65 db y superiores a 65 db, C_{a1} y C_{a2} corresponden a sus respectivos costes unitarios, $S_{m^2}^{i,b} C_{m^2}$ pertenece a la superficie afectada por el descenso del precio del suelo debido a la contaminación acústica y su respectivo coste medio de descenso del suelo (m^2) en las proximidades de la infraestructura, i es el modo de transporte, b el ámbito y C_{mrr} concierne al coste total de las medidas aplicadas por la administración o las empresas de explotación de infraestructuras para la disminución del ruido (pantallas anti ruido, pavimentos porosos, etc.).

De los resultados del proyecto SILVIA (*Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control*) se muestra cómo varía el ruido de acuerdo con el tipo de vehículo y la velocidad, como se indica en la figura A1.4.

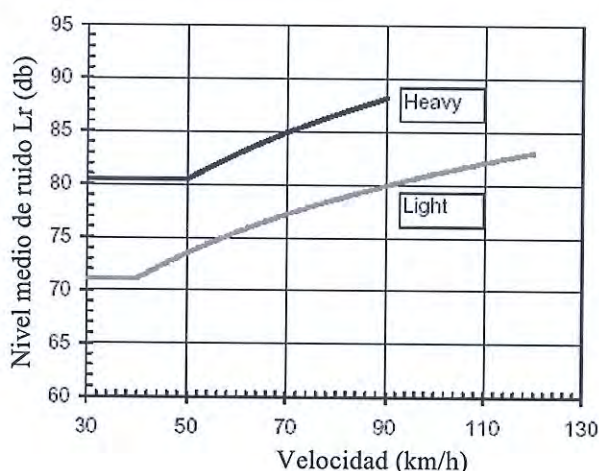


Fig. A1.4. Predicción del ruido empleando el método Nórdico para vehículos pesados y ligeros que viajan a velocidad constante. (Fuente: Nielsen, 2005).

En esta gráfica se observa cómo a velocidades bajas el ruido permanece constante mientras que a mayores velocidades se incrementa el número de revoluciones del motor y en consecuencia se incrementa el ruido.

La tabla A1.4 muestra las ecuaciones empleadas para la construcción de la figura A1.4. En ellas se definen la relación entre el ruido (medido a 10m del eje central de la vía) y la velocidad.

Tabla A1.4. Relación entre el ruido y la velocidad para vehículos ligeros y pesados. (Fuente: Nielsen, 2005).

Lr (ligero) = $73.5 + 25 \times \log(v/50)$	Para $v > 40$ km/h
Lr (ligero) = 71.1	Para 30 km/h $< v < 40$ km/h
Lr (pesado) = $80.5 + 30 \times \log(v/50)$	Para $v > 50$ km/h
Lr (pesado) = 80.5	Para 30 km/h $< v < 50$ km/h

Los niveles medios de ruido (L_{Aeq}) para un intervalo de tiempo dado y medido a 10m del eje central de la vía se calculan empleando las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} L_{rT}(\text{liviano}) &= L_{AE}(\text{liviano}) + 10 \log(q(\text{liviano})/T) \\ L_{rT}(\text{pesado}) &= L_{AE}(\text{pesado}) + 10 \log(q(\text{pesado})/T) \end{aligned} \quad (A1.13)$$

Donde q es el número de vehículos (ligeros o pesados) durante el periodo de tiempo T (seg). El nivel medio diario de ruido $L_{Aeq, 24h}$ se calcula empleando la IMD y un tiempo $T=86400$ seg.

El nivel de ruido total para una carretera con vehículos mixtos se predice empleando la ecuación:

$$L_{Aeq,T}(\text{tráfico mixto}) = 10 \times \log(10 L_{Aeq}(\text{ligeros})/10 + 10 L_{Aeq}(\text{pesados})/10) \quad (A1.14)$$

A1.4 Accidentes

De acuerdo con la OMS (2004), las lesiones causadas por el tránsito constituyen un importante problema de salud pública que es desatendido, cuya prevención eficaz y sostenible exige esfuerzos concertados. De todos los sistemas con los que las personas han de enfrentarse cada día, los del tránsito son los más complejos y peligrosos. Se estima que cada año, en el mundo mueren 1,2 millones de personas por causa de choques en la vía pública y hasta 50 millones resultan heridas. Las proyecciones indican que sin un renovado compromiso con la prevención, estas cifras aumentarán en torno al 65% en los próximos 20 años.

Tabla A1.5. Riesgos de desplazarse en distintos medios de transporte por carretera en los países de la Unión Europea. (Fuente: OMS 2004)

Defunciones por cada 100 millones de kilómetros-pasajero y por cada 100 millones de horas de viaje-pasajero en los países de la Unión Europea durante el periodo 2001-2002		
	Defunciones por cada 100 millones de kilómetros- pasajero ^a	Defunciones por cada 100 millones de horas de viaje-pasajero ^b
En la vía pública (total)	0,95	28
En vehículos de motor de dos ruedas	13,8	440
A pie	6,4	75
En bicicleta	5,4	25
En automóvil	0,7	25
En autobús o autocar	0,07	2

^a Por kilómetros-pasajero se entiende la distancia total recorrida por todos los que han viajado de ese modo.

^b Por horas de viaje-pasajero se entiende el tiempo total que han pasado viajando todos los que han utilizado ese medio.

Según distribución de las defunciones causadas por el tránsito, los más vulnerables son los peatones, ciclistas y conductores de ciclomotores y motocicletas. En los países de ingresos bajos y medianos representan un gran porcentaje del tráfico y agrupan la mayor

parte de las muertes. En los países de ingresos altos, la vía pública es utilizada mayoritariamente por propietarios y conductores de automóviles, y en ellos se concentran la mayor proporción de las defunciones causadas por el tránsito. Aun así, incluso en estos países, peatones, ciclistas y conductores de motocicletas corren un riesgo mayor de fallecer por kilómetro recorrido. La tabla A1.5 muestra los riesgos de desplazarse en distintos medios de transporte por carretera en los países de la Unión Europea.

De acuerdo con Lindberg (2005), la cuantificación de un accidente de tráfico se puede dividir en costes económicos directos, indirectos y el valor de la seguridad *per se*. Los costes directos son observables como un gasto actual o en el futuro e incluyen costes médicos y de rehabilitación, costes legales, servicios de emergencia, daños materiales, etc. Los costes indirectos son la pérdida de capacidad de producción que resulta de una muerte prematura o una invalidez debida al accidente.

En cuanto al valor de la seguridad *per se*, está relacionado con la voluntad a pagar - VAP- de las personas para reducir la probabilidad prematura o riesgo de muerte. Los métodos básicos para estimar la VAP consisten en métodos de encuesta *preferencias reveladas y preferencias declaradas*¹, siendo estas últimas las preferidas por los investigadores utilizando técnicas de estudio del salario-riesgo, para estimar la prima de salario asociada con el riesgo de muerte. La tasa marginal de sustitución de riqueza para la probabilidad de muerte se transfiere al valor de la esperanza de vida.

Asumiendo que el conductor de un coche particular o de transporte público es (i) consciente del riesgo de accidente que se relaciona con cada viaje que hace y (ii) que es capaz de asumir todos los costes que acarrea un accidente. Bajo estas dos hipótesis, los conductores serían conscientes del incremento en el coste de accidentarse por cada decisión de viajar. Este coste, junto con los costes de operación, el coste del tiempo y otros costes por efectos externos tendrían que valorarse y compensarse con respecto a los ingresos o beneficios del viaje. Si se evalúan estas circunstancias, la decisión de viajar y otras decisiones relacionadas con la seguridad (como la conducta y la escogencia del tipo de vehículo) sería social y económicamente eficiente.

Diversos autores se han centrado en la relación exclusiva entre volumen de tráfico y accidentes en vehículos homogéneos (solamente coches) o tráfico heterogéneo (coches y otros usuarios). Otros estudios indican que tanto coches como usuarios desprotegidos de la carretera asumen un riesgo independientemente del flujo vehicular. Lindberg (2005), centra el coste marginal externo del accidente (CMa_j^e) en un coste por distancia recorrida e indica que la tarifa a cobrar se debe basar en la magnitud del riesgo, el coste del supuesto accidente que el conductor u operador no ha producido aún y aumenta

¹ *Preferencias Reveladas*: son datos que reflejan el comportamiento actual de los individuos en la toma de decisiones. Estos se obtienen a partir de encuestas que permiten recoger información de las variables que explican la utilidad de las distintas alternativas y de las elecciones realizadas.

Preferencias Declaradas: conjunto de metodologías que se basan en datos declarados que tratan de reflejar lo que los individuos harían ante determinadas situaciones hipotéticas construidas por el investigador.

como consecuencia de su decisión de viajar. La expresión A1.15 corresponde al coste total anual de los accidentes (Ca), donde el vehículo j se ha involucrado, A es el número de accidentes y $(a+b+c)$ corresponde a los costes de la esperanza de vida basada en la voluntad a pagar (a), (b) es la esperanza de vida adicional basada en la voluntad a pagar por parte de familiares y amigos y (c) es el coste adicional del accidente para el resto de la sociedad generalmente material. Involucrar al vehículo j significa que el vehículo forma parte del accidente, sin importar quién salió lastimado o quién fue el culpable. r es el riesgo que depende del incremento del volumen de tráfico Q de categoría j involucrado en el accidente, y cuyo efecto se refleja como un riesgo-elasticidad E .

$$Ca_j = A(a+b+c) = rQ(a+b+c) \quad (A1.15)$$

Luego,

$$r = \frac{A}{Q} \quad (A1.16)$$

Y,

$$E = \frac{\partial r}{\partial Q} \frac{Q}{r} \quad (A1.17)$$

El coste marginal (CMA_j) con respecto al volumen de tráfico para un vehículo de categoría j puede escribirse mediante la ecuación A1.18, la cual da origen a la expresión A1.19, que corresponde al coste marginal externo del accidente; donde CMA_P es el coste marginal privado ya internalizado.

$$CMA_j = \frac{\partial A}{\partial Q} (a+b+c) = r(E+1)(a+b+c) \quad (A1.18)$$

$$CMA_j^e = CMA - CMA_P \quad (A1.19)$$

Si se introduce θ como la proporción de coste del accidente por colisión que cae sobre los vehículos de tipo j , el coste marginal externo del accidente se expresa mediante la ecuación A1.20.

$$CMA_j^e = r(a+b)[(1-\theta)+E] + rc(1+E) \quad (A1.20)$$

La anterior expresión indica que el coste marginal externo será alto si:

- El riesgo r del accidente es alto;
- El coste por accidente $(a+b+c)$ es alto;
- La mayoría de los costes caen sobre otros grupos de usuarios ($\theta \approx 0$);

- El riesgo se incrementa cuando el tráfico se incrementa ($E > 0$);
- O una gran parte del coste del accidente lo paga la mayoría de la sociedad (c).

Existen diversas formas funcionales que relacionan la probabilidad de frecuencia de un accidente con el flujo, indicando que si un vehículo circula por una carretera o una intersección es un “ensayo”, cuyo resultado puede ser que “suceda” o “no suceda” un accidente con una determinada probabilidad. Asumiendo además, que el paso de los vehículos no es tan frecuente que la probabilidad no esté influenciada por la frecuencia de que el “ensayo” ocurra. Bajo estas condiciones el número de accidentes esperados en un periodo de tiempo fijo debería ser proporcional al número de ensayos que se realicen en ese periodo de tiempo, es decir, el flujo.

$$m = \alpha q^k e^{\beta q} \quad (\text{A1.21})$$

Donde: α, β son parámetros que se deben calibrar debido a las múltiples variables que intervienen en un accidente, $k = 1$ o 2 dependiendo de los requerimientos que se tengan cerca del origen. Cuando $\beta < 0$ la función tiene un máximo en $q = -k / \beta$.

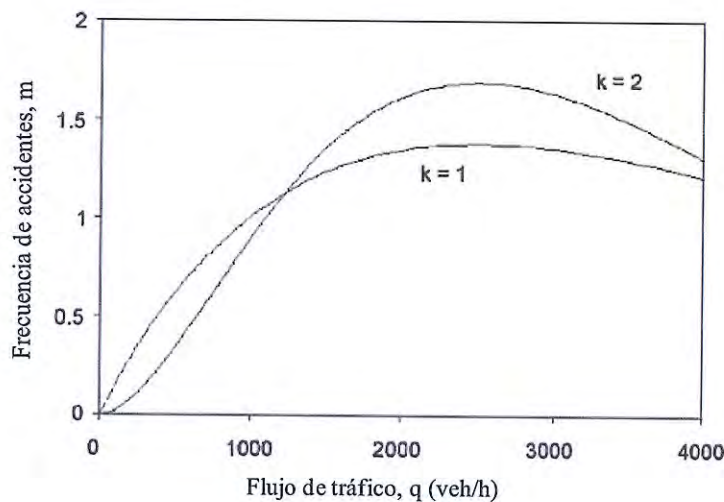


Fig. A1.5. Probabilidad de accidentes en función del flujo de tráfico. (Fuente: Ardekani, 1991).

En muchas investigaciones se ha empleado la ecuación A1.22 para relacionar la frecuencia de accidentes con la IMD y la IMDA. Persaud (1992), empleó datos de vías interurbanas de Ontario y encontró que el exponente de la IMDA fue de 0,62 cuando tenían separador y de 1.13 cuando no lo tenían. Mientras que para vías urbanas de dos carriles el exponente fue de 0.72 y para vías urbanas multicarriles (con y sin separador) fue de 1.14.

$$m = \alpha (IMD)^{\beta + \lambda \log(IMD)} \quad (\text{A1.22})$$

A1.5 Congestión

La palabra congestión es identificada por la sociedad en general como un problema originada por el elevado incremento de personas o vehículos que coinciden en un mismo lugar durante un tiempo determinado. Con respecto al flujo vehicular en una carretera y de acuerdo con el nivel de referencia, algunos investigadores definen el comienzo de la congestión como el momento en que se forma una cola en un punto de embotellamiento como la que se presenta en un puente, o un túnel, (modelos de embotellamiento). Para otros, el nivel de referencia es una velocidad media y se producen demoras por congestión cuando la velocidad media del periodo estudiado es menor que la referencia (independientemente de si se ha formado cola o no).

Tomando la velocidad como nivel de referencia, se sabe que dependiendo del tipo de carretera (autopista interurbana, metropolitana, arteria urbana, calle local, etc.), la congestión será diferente, dada las condiciones de flujo continuo o discontinuo (presencia de semáforos o señales) existente, además, dependiendo de varios factores de diseño cada carretera tendrá una máxima capacidad para que en condiciones normales circule una determinada cantidad de vehículos de acuerdo con el nivel de servicio (calidad) que se quiera ofrecer. En general, puede definirse la congestión vehicular como la aparición de demoras causadas por la interacción entre vehículos durante el viaje en una carretera y se puede estudiar a nivel microscópico, donde el movimiento de vehículos individuales se puede rastrear, o a nivel macroscópico, donde el flujo vehicular se estudia con la teoría dinámica de fluidos. La teoría de colas y la teoría de seguimiento vehicular son formas de análisis microscópico, que se estudian en condiciones determinadas del flujo, Lindsey y Verhoef (2000).

Utilizando los principios de la dinámica de fluidos se deduce la teoría del flujo vehicular para representar la forma en que los vehículos circulan por una carretera determinada, llegando a que la corriente de tráfico se puede describir por tres variables macroscópicas definidas bajo condiciones de flujo estacionario en cada punto del diagrama tiempo-espacio, las cuales se encuentran relacionadas mediante la ecuación fundamental:

$$q = v_e k \quad (\text{A1.23})$$

Donde: q es el flujo vehicular (veh/carril-hora), v_e es la velocidad media espacial (km/h) y k es la densidad (veh/carril-km).

Por décadas se ha estudiado la forma de las curvas del diagrama fundamental del flujo de tráfico (May, 1990), dado que la forma precisa para un segmento de carretera depende de varios factores, entre ellos se tienen, el ancho y número de carriles, pendiente, radio de giro, límite de velocidad, localización de las rampas de entradas y salidas, clima, composición vehicular, viajeros frecuentes y familiarizados con la vía e idiosincrasia de los conductores locales (Lindsey y Verhoef, 2000). En la figura A1.6 se ilustran las relaciones entre densidad-velocidad empleando diversos modelos.

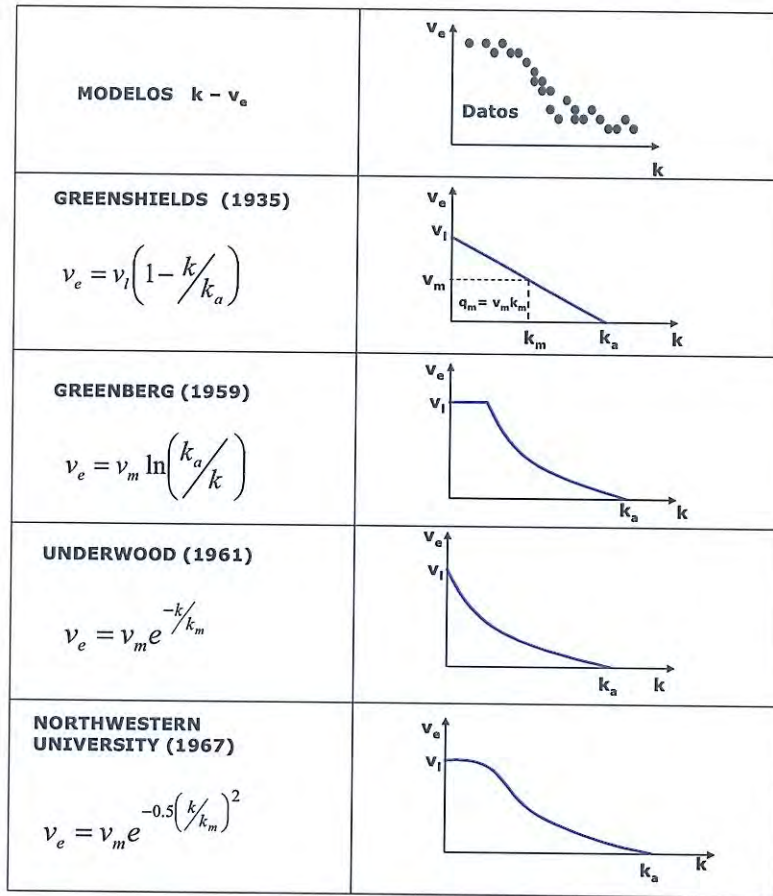


Fig. A1.6. Relaciones entre densidad-velocidad empleando diversos modelos. (Fuente: Elaborada a partir de May, 1990).

Con base en detectores (bucles) embebidos en el pavimento de un tramo de una carretera se obtienen datos de las diferentes variables del tráfico vehicular (ver figura A1.7) que son enviados a una estación de control, para luego ser almacenados y procesados de tal forma que se puedan establecer relaciones entre las distintas variables y posteriormente graficarlos, como por ejemplo, los recolectados en el sentido norte de la Autopista Interestatal 880 en Hayward, California, cuyas gráficas se ilustran en la figura A1.8.



Bucles bajo la calzada de la autopista M-45 de Madrid.



Fig. A1.7. Bucles para toma de información del tráfico vehicular en un tramo de carretera. (Fuente: Dragados concesiones. Curso avanzado en infraestructuras. UPC. 2004).

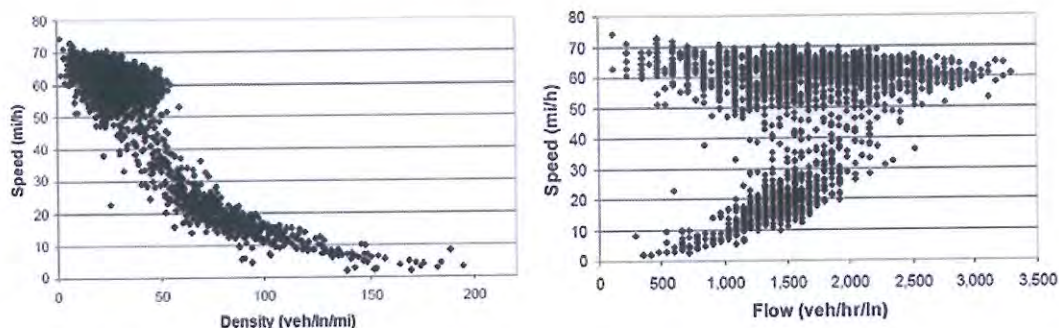


Fig. A1.8. Relaciones de Velocidad vs. Densidad y Velocidad vs. Flujo, en el sentido norte de la Autopista Interestatal 880 en Hayward (1993), California. (Fuente: Kockelman, K. 2004).

La figura A1.9 representa la relación entre las variables macroscópicas del tráfico, deducidas del diagrama fundamental del flujo vehicular. En la figura A1.9(a), se representa la curva velocidad-densidad, donde los conductores por razones de seguridad reducen la velocidad a medida que se incrementa la densidad.

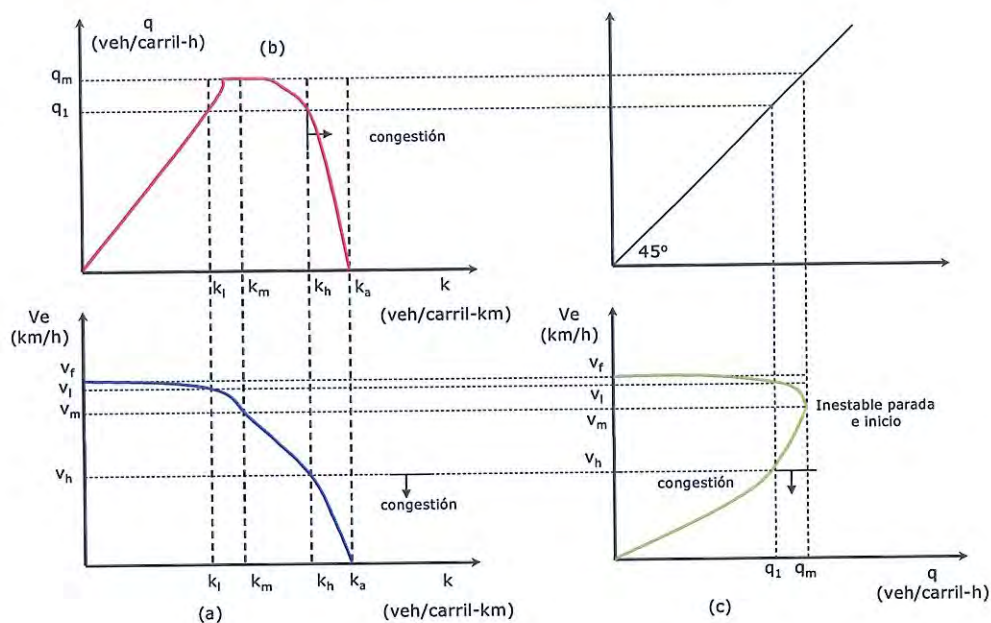


Fig. A1.9. (a) Curva de Velocidad vs. Densidad; (b) Curva de Flujo vs. Densidad; (c) Curva de Velocidad vs. Flujo.

Con base en la figura A1.9(c) que demuestra la relación entre la velocidad-flujo, los economistas la han transformado para determinar los costes de la congestión y la han separado en la rama superior para indicar la pérdida de velocidad y la rama inferior para indicar la congestión. En el momento que el flujo comienza a incrementarse, la velocidad v_f que inicialmente era a flujo libre empieza a disminuir, aumentando el tiempo de viaje lo que origina demoras, y a medida que aumenta el volumen de tráfico, la velocidad se reduce hasta llegar al valor v_m , donde la carretera alcanza su máxima capacidad, q_m . En este punto, el flujo se vuelve inestable, con características de parada e inicio, condiciones típicas de un atasco. Si siguen ingresando más vehículos en la

carretera, el flujo y la velocidad caen rápidamente, dando como resultado un flujo forzado o congestión. Se nota que cualquier flujo $q_1 < q_m$ se puede presentar con una baja densidad y alta velocidad (k_1, v_1) o a una alta densidad y baja velocidad (k_h, v_h) .

Walters (1961), fue el primero en transformar la curva velocidad-flujo en una curva de costes, aplicando la teoría de coste marginal y estimar así un sistema eficiente de tarifación para una red de carreteras, lo que permite determinar que el coste medio del viaje por kilómetro (c_i) de un vehículo representativo está dado por:

$$c_i = c_{op} + \frac{v_t}{v_e} \quad (A1.24)$$

Donde: c_{op} son los costes de operación por vehículo ligero por kilómetro (€/veh-km), v_t es el valor del tiempo para el vehículo representativo (€/veh-h) (por ejemplo, se tiene en cuenta factores como el valor del tiempo tanto para conductor como ocupantes), y v_e es la velocidad media en km/h. Luego el coste total por kilómetro para un flujo de nivel q (veh/h) está dado por $C_T = c_i q$. Si se añade un vehículo adicional al flujo, el coste social total marginal se determina así:

$$\frac{dC_T}{dq} = c_i + q \frac{dc_i}{dq} \quad (A1.25)$$

El coste de congestión o la externalidad de congestión soportado por los usuarios está dado por: $q \frac{dc_i}{dq}$, donde, al diferenciar la ecuación A1.25 se obtiene:

$$q \frac{dc_i}{dq} = -q \frac{v_t}{v_e^2} \frac{dv_e}{dq} = CMa(q) \quad (A1.26)$$

Por consiguiente, este coste marginal externo de congestión varía con: $\frac{dv_e}{dq}$, la pendiente de la relación velocidad-flujo que se modifica con el tipo de carretera y volumen de tráfico, q el volumen de tráfico (veh/h), la v_e velocidad media resultante, que cambia con el tipo de carretera y volumen de tráfico y el valor del tiempo v_t , que se transforma con el propósito del trayecto y los ingresos de los usuarios.

A1.6 Cuantificación de los costes de las externalidades negativas

A continuación se muestran los resultados para el transporte por carretera en zonas urbanas obtenidos en el proyecto UNITE (Nash et al. 2003), cuyo objetivo era desarrollar políticas de tarifación e impuestos para los diversos modos de transporte tanto de pasajeros como de carga en Europa, teniendo en cuenta tres aspectos

fundamentales: los costes marginales, la contabilidad (costes, beneficios e ingresos) del transporte y un enfoque de integración.

No existe una única metodología para determinar los costes marginales externos, sin embargo, siguiendo enfoques de tipo econométrico y de ingeniería se pueden estimar valores de dichos costes para los distintos modos de transporte. La figura A1.10 muestra los diversos costes externos para el vehículo privado así como para camiones.

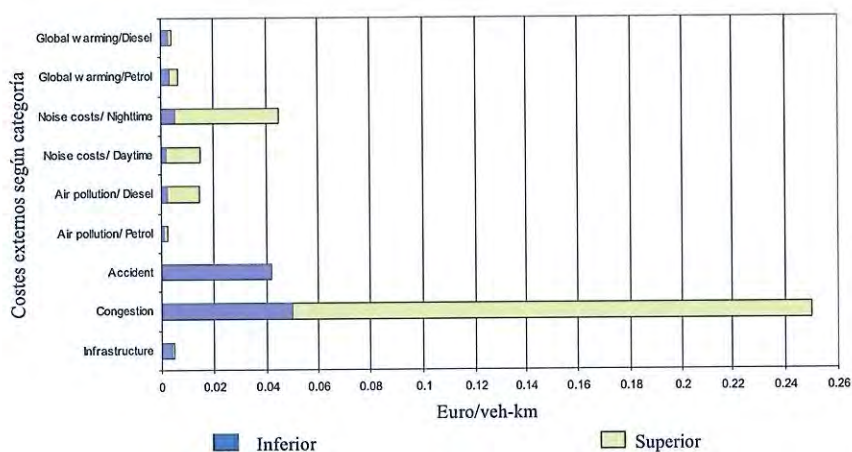


Fig. A1.10a. Revisión del Coste Marginal para vehículo privado en zona urbana en €/veh-km. (Fuente: Nash, 2003).

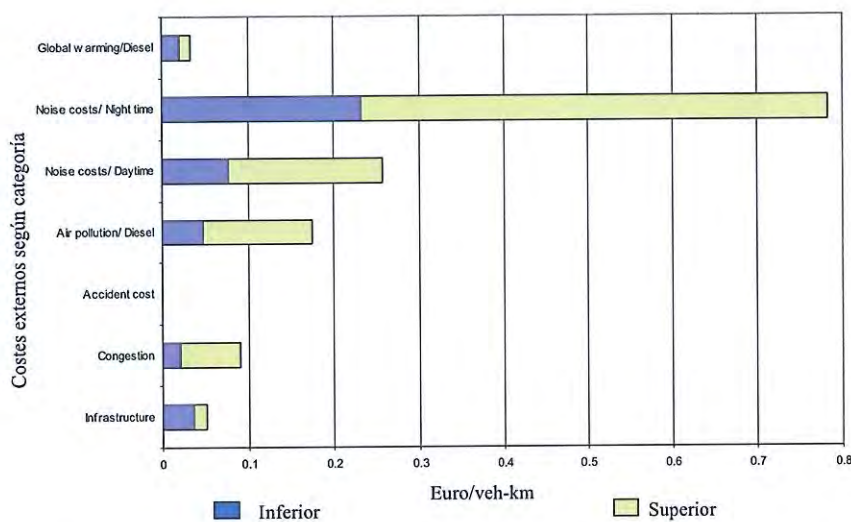


Fig. A1.10b. Revisión del Coste Marginal para vehículo pesado en zona urbana en €/veh-km. (Fuente: Nash, 2003).

En términos de costes externos, para el coche particular en áreas urbanas, como se esperaba, los costes de la congestión predominan generalmente, seguidos por el ruido y la contaminación atmosférica (especialmente para los que usan diesel), continúan los costes debidos a la accidentalidad los cuales son significativos en áreas urbanas, mientras que los costes por calentamiento global son menores. Fuera de las áreas urbanas, los costes de la contaminación atmosférica y ruido son menores.

Dentro del proyecto UNITE, también se encuentra la tabla A1.6 que ilustra los costes tanto en millones de euros como en (€/veh-km) de: infraestructura (costes de capital y de funcionamiento), los costes de congestión, medioambientales (polución y ruido), calentamiento global y la parte de los costes por accidentalidad que se pagan para los fondos públicos (costes nacionales del seguro médico, costes de policía, costes de rescate, daño a bienes no cubiertos por el seguro, pérdida de producción, etc.).

Tabla A1.6. Costes externos del transporte por carretera para países Europeos en 1998, en millones de Euros y (€/veh-km). (Fuente: Elaborada a partir de Nash, 2003).

País	Costes de infraestructura	Costes de Congestión	Costes por Polución del aire	Costes del ruido	Costes de Calentamiento Global	Costes externos de Accidentes
Austria	4382 (0.0740)	1555 (0.0263)	833 (0.0141)	329 (0.0056)	36 (0.0064)	1367 (0.0231)
Belgica	1570	- ¹	1671	655	625	877
Dinamarca	400	407	496	- ¹	265	679
Finlandia	1119	- ¹	435	112	253	232
Francia	25520	17293	14087	3989	2611	1528
Alemania	26176	17381	8411	6245	3849	14592
Grecia	2802	5192	978	266	320	3355
Hungría	6075	792	1163	180	191	- ¹
Irlanda	263	401	312	352	165	240
Italia	13645	- ¹	7229	2784	2324	4145
Luxemburgo	105	- ¹	61	33	36	56
Países bajos	4411	3103	1482	311	686	1421
Portugal	1791	121 ²	472	212	483	501
España	6224	3312	2067	2965	1474	2307
Suecia	2172	- ¹	456	143	383	953
Suiza	4030	587	532	521	202	925
Reino Unido	12728	19371	5192	5768	2392	1994
Total	113413	69515	45877	24865	16295	35172

¹ Sin datos

² Solamente Áreas Metropolitanas de Lisboa y Oporto

ANEXO 2

ELASTICIDAD DE LA DEMANDA RESPECTO A LOS DIFERENTES COSTES DEL VIAJE EN COCHE

A2.1 Definición de elasticidad

El concepto de elasticidad fue propuesto por el economista británico Alfred Marshall (1842-1924) en su obra *Principios de economía* publicada en 1890, buscando la forma de resumir la afectación o sensibilidad de una variable que depende de otra. Es decir, la elasticidad da el impacto al cambio de una variable independiente sobre una variable dependiente, ambas medidas en variación porcentual, TRACE (1999).

Si el impacto sobre el número de kilómetros que se recorren en coche debido al aumento del 1% en el precio de combustible es una disminución del 0.3%, se dice que la elasticidad de la demanda (medida en número de kilómetros recorridos) respecto al precio de combustible es -0.3, siendo este valor adimensional.

La elasticidad se define usando la condición del “*ceteris paribus*”, indicando que es válido bajo el supuesto que el resto de variables permanecen constantes.

La magnitud de la elasticidad puede ser negativa o positiva. Si la elasticidad es superior a la unidad (en términos absolutos) se dice que la variable dependiente es “*elástica*” y si el valor de la elasticidad está comprendida entre (0,1) entonces la variable dependiente es “*inelástica*”. En caso de que sea igual a la unidad se dice que la elasticidad es *unitaria*.

Existen diferentes formas de elasticidades, entre las que se destacan la elasticidad puntual y la de arco. La *elasticidad puntual* mide el cambio proporcional de la variable dependiente como resultado de un pequeño cambio proporcional en la variable independiente. En el caso de la elasticidad-precio de la demanda se tiene que la elasticidad puntual es:

$$\eta = \frac{\partial Q}{\partial P} \frac{P}{Q} \quad \text{A2.1}$$

Para una aproximación de la elasticidad puntual, se emplea la relación de contracción (*shrinkage ratio*), definida como:

$$\eta = \frac{\Delta Q}{\Delta P} \frac{P_0}{Q_0} = \frac{Q_1 - Q_0}{P_1 - P_0} \frac{P_0}{Q_0} \quad \text{A2.2}$$

En análisis del transporte, se utiliza la *elasticidad de arco* cuando el cambio en la variable independiente es significativo y se basa en los valores inicial y final tanto de la demanda como del precio, tal como se muestra en la ecuación A2.3. Mientras que, si se emplea una tarifa cero (antes o después del cambio) en la variable independiente, se utiliza la *elasticidad del punto medio* para medir el cambio en la variable dependiente, y que se expresa en la ecuación A2.4. Donde: Q_0 y Q_1 son las demandas antes y después y P_0 , P_1 son los precios antes y después del cambio.

$$\eta = \frac{\Delta \log Q}{\Delta \log P} = \frac{\log Q_1 - \log Q_0}{\log P_1 - \log P_0} \quad \text{A2.3}$$

$$\eta = \frac{\Delta Q (P_1 + P_0)}{\Delta P (Q_1 + Q_0)} = \frac{(Q_1 - Q_0)(P_1 + P_0)}{(P_1 - P_0)(Q_1 + Q_0)} \quad \text{A2.4}$$

Históricamente se ha usado la relación de contracción para explicar la respuesta de la demanda ante un cambio de tarifas, sobre todo si estas aumentan. Sin embargo, este método no es muy aproximado cuando se presenta un cambio considerable (superior al $\pm 50\%$) entre los costes antes y después, descrito en la figura A2.1.

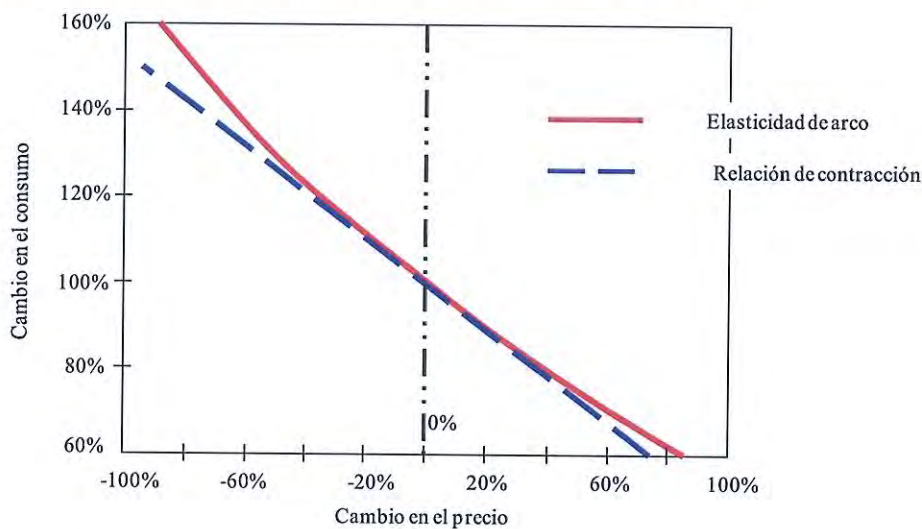


Fig. A2.1. Comparación entre la elasticidad de arco y la relación de contracción. La elasticidad de arco está basada en una función exponencial que arroja mejores resultados cuando hay grandes cambios en los precios. (Fuente: Victoria Transport Policy Institute, 2006).

Otra forma de elasticidad es la *elasticidad-precio cruzada* que mide el porcentaje de cambio en el consumo de un bien debido a las variaciones del precio de algún otro bien

relacionado con el primero. Por ejemplo, los viajes en coche son complementarios con los sitios de parking y un sustituto a los viajes en transporte público.

Aunque la elasticidad se reporta como un solo valor, existen diversos factores que pueden afectar la sensibilidad al precio de un bien particular, es por ello que las elasticidades actualmente son funciones con diversas variables que incluyen el tipo de mercado, el tipo de consumidor y el período. Por ejemplo, aunque la elasticidad del viaje de un vehículo respecto al precio de combustible se puede definir como - 0.3 (un solo valor), el valor real podría variar entre -0.1 y -0.8 dependiendo del tipo de viaje (comercial, *commuter*, recreacional, etc.), del tipo de conductor (rico, pobre, joven, viejo, etc.), de las condiciones del viaje (rural, urbano, hora pico, hora valle), y del período considerado (corto plazo, medio o largo plazo).

A2.2 Factores que afectan la sensibilidad del precio

Dependiendo del tipo de tarifas se presentan impactos en la conducta de los viajeros. Los costes de compra y registro del vehículo pueden afectar el número y tipo de vehículos comprados. Los precios del combustible al igual que los impuestos por emisión influyen en el tipo de vehículo a usar. El coste del peaje puede cambiar el destino o forzar a usar otras rutas; mientras que la tasa por congestión (tarifas más altas durante los períodos congestionados) puede disminuir los tiempos de recorrido, reducir el número de viajes o cambiar de modo de transporte. Estos impactos dependen del tipo de tarifación que se aplique. Por ejemplo, un aumento en las tarifas de parking en las zonas residenciales afectaría a los propietarios del vehículo, mientras que, una tarifa variable en tiempo para el estacionamiento puede influir en la generación de viajes. La tabla A2.1 resume cómo los diferentes cambios en el precio producen diversos tipos de impactos sobre la conducta del viaje.

Tabla A2.1. Impactos debidos a los diferentes tipos de tarifación. (Fuente: Victoria Transport Policy Institute, 2006).

TIPO DE IMPACTOS	Impuestos al vehículo	Precio del combustible	peajes	Tarifa por congestión	Tarifa por estacionamiento	Pasaje en transporte público
Propietario del vehículo: afecta en el número de vehículos a tener.	☐				☐	☐
Tipo de vehículo: los vehículos se escogen según consumo combustible, emisiones, etc.	☐	☐				
Cambio de ruta: modificación de rutas.			☐	☐	☐	
Viajes a otras horas: preferencia por viajar en horas valle.				☐	☐	
Cambio de modo: uso de modos alternativos para el viaje.		☐	☐	☐	☐	☐
Cambio de destino: búsqueda de destinos alternativos de viaje.		☐	☐	☐	☐	☐
Generación de viajes: se disminuye el número total de viajes, incluso los compartidos.		☐	☐	☐	☐	
Cambios en el uso del suelo: cambios en las decisiones de localización, tales como donde vivir o trabajar.			☐		☐	☐

Es de anotar que la elasticidad-precio de la demanda variará según el tipo de modelo que se utilice y los datos que se obtengan para su evaluación. Estos datos se pueden obtener a través de encuestas utilizando los métodos de preferencias declaradas o preferencias reveladas, TRACE (1999).

En el caso de observaciones hechas a viajeros individuales (por familia o persona), se emplean modelos desagregados, mientras que si la observación es sobre un grupo específico se utilizan los modelos agregados para evaluar la toma de decisiones.

Es más, la magnitud de la elasticidad puede variar dependiendo de las condiciones o circunstancias que se quieran analizar. Las condiciones relevantes pueden ser:

- Zona geográfica del estudio: región, ciudad, país, continente, etc.;
- Periodo de análisis: corto plazo o largo plazo;
- Propósito del viaje: de la casa al trabajo, negocios, de compras, educación, etc.;
- Nivel de urbanización;
- Composición de la población, en términos de edad, sexo, etc.;
- Ingresos;
- Cantidad de propietarios de vehículos;
- Nivel de tarifas existentes;
- Velocidad de operación actual;
- Modos de transporte actual además del coche.

A2.3 Estimación de valores de elasticidades

Los valores de las elasticidades de diversos tipos de precios en transporte, se han estimado en varias investigaciones. A continuación se presenta un resumen de dichos valores, información tomada de *Victoria Transport Policy Institute* (2006).

A2.3.1 Costes de operación vehicular

Se refiere a los efectos del viaje debidos a los gastos en que se incurre al mover el vehículo (por ejemplo, los costes variables), incluyen el combustible, pago por estacionar y peajes. Oum, Waters, y Yong (1992), estiman la elasticidad del viaje en coche respecto al precio en -0.23 en el corto plazo y -0.28 en el largo. Oum, Van Ooststroom y Yoon (1996), encuentran para los Países Bajos la elasticidad del viaje en coche en el rango comprendido entre -0.02 y -0.28. De Borger et al. (1997), determinan para las zonas urbanas de Bélgica elasticidades de -0.384 para coches y para transporte público de -0.35, viajando en hora punta, mientras que para horas valle los resultados son mayores. Button (1993), estima la elasticidad en zonas urbanas para varios tipos de viaje respecto a los gastos de operación del vehículo entre -2.7 y -3.2 para compras, mientras que para *commuters* dicho valor está entre -0.3 y -2.9. Small y Winston (1999), estipulan la elasticidad según el número de vehículos por familia y respecto a los costes de operación en -0.228 y -0.279 para un vehículo en el corto y largo plazo, respectivamente, y en -0.059 y -0.099 para dos vehículos en el corto y largo plazo, correspondientemente.

A2.3.2 Tarifas por estacionamiento

Los conductores son particularmente sensibles a las tasas por aparcar ya que es un gasto directo y por lo tanto causa un gran efecto sobre el total de viajes que se hacen en coche

Kuzmyak, Weinberger y Levinson (2003), describen cómo la oferta de estacionamientos afecta tanto al *parking* como la demanda de viajes, reflejando un impacto en el precio (si se reduce la oferta de estacionamientos la tarifa se incrementa). Estos estudios indican que la elasticidad de los viajes en coche respecto a precios del estacionamiento se encuentra entre -0.1 y -0.3, con una variación significativa dependiendo de la demografía, geografía, la elección y características del viaje. Pratt (1999), encuentra elasticidades más altas entre -0.9 y -1.2 del precio del estacionamiento respecto a los ingresos brutos del estacionamiento comercial, ya que los conductores prefieren pagar tarifas más altas a cambio de reducir la duración de su estacionamiento o cambiar a localizaciones y horas más económicas, así como reducir el total de viajes en coche.

El proyecto TRACE (1999), proporciona las estimaciones detalladas de la elasticidad de varios tipos de viajes (coche-viajes, coche-kilómetros, transporte público, caminar/uso de bicicleta, *commuting*, viajes de negocios, etc.), respecto al precio del estacionamiento bajo varias condiciones (por ejemplo, nivel de propiedad del vehículo, uso de transporte público, tipo de viaje, etc.). La tabla A2.2 resume las elasticidades a largo plazo.

Tabla A2.2. Elasticidades a largo plazo de la tarifa de estacionamiento. (Fuente: Victoria Transport Policy Institute, 2006).

Condiciones/Propósito	Vehículo particular		Transporte público	Caminar/bicicleta
	Conductor	Pasajero		
Viajes				
<i>Commuting</i>	-0.08	+0.02	+0.02	+0.02
Negocios	-0.02	+0.01	+0.01	+0.01
Educación	-0.10	+0.00	+0.00	+0.00
Otros	-0.30	+0.04	+0.04	+0.05
Total	-0.16	+0.03	+0.02	+0.03
Kilómetros				
<i>Commuting</i>	-0.04	+0.01	+0.01	+0.02
Negocios	-0.03	+0.01	+0.00	+0.01
Educación	-0.02	+0.00	+0.00	+0.00
Otros	-0.15	+0.03	+0.02	+0.05
Total	-0.07	+0.02	+0.01	+0.03

Hensher y King (2001), modelan la elasticidad del precio de estacionamiento en el CBD “*Central Business District*” y predicen que el aumento en las tarifas del estacionamiento en determinada zona obligará a que los coches cambien de sitio para estacionarse dirigiéndose hacia otros lugares o a desplazarse en transporte público. Sus resultados se resumen en la tabla A2.3.

Tabla A2.3. Elasticidades a la tarifa de estacionamiento según la localización. (Fuente: Victoria Transport Policy Institute, 2006).

	Preferencia en el CBD	Poca preferencia en el CBD	En la periferia del CBD
Viajes en coche, prefiriendo el CBD	-0.541	0.205	0.035
Viajes en coche, con poca preferencia en el CBD	0.837	-0.015	0.043
Viajes en coche, en la periferia del CBD	0.965	0.286	-0.476
<i>Park & Ride</i>	<i>0.363</i>	<i>0.136</i>	<i>0.029</i>
<i>Viajando en transporte público</i>	<i>0.291</i>	<i>0.104</i>	<i>0.023</i>
No viajar al CBD	0.469	0.150	0.029

Esta tabla muestra las elasticidades y las elasticidades cruzadas para cambios en los precios del estacionamiento en las varias localizaciones del CBD. Por ejemplo, un aumento del 10% en los precios de estacionamientos con preferencia en el CBD causará una reducción de la demanda en un 5.41%, un aumento del 3.63% en *Park & Ride*, un incremento del 2.91% en viajes en transporte público y una reducción del 4.69% en el total de viajes al CBD.

A2.3.3 Consumo de combustible respecto al precio del mismo

Un incremento en el precio del combustible causa una combinación entre reducción de los viajes y un incremento en la eficiencia del combustible. Glaister y Graham (2000), hicieron una revisión de estudios internacionales de los efectos del precio del combustible y la renta sobre los viajes en coche y el consumo de combustible. Encontraron que las elasticidades a corto plazo oscilan entre -0.2 y -0.5, y a largo plazo varían entre -0.24 en USA (con variaciones de -0.24 a -0.8) y hasta -1.35 en la OCDE (con variaciones de -0.75 a -1.35). Identificaron una serie de parámetros que afectan los valores de la elasticidad del precio de combustible, entre ellos la forma funcional, duración, factores geográficos, y otros agentes como la propiedad del vehículo, además, señalan que a largo plazo la demanda de combustible se torna más elástica. Concluyeron que a corto plazo la elasticidad varía entre -0.2 y -0.3, y a largo plazo oscila desde -0.6 a -0.8. También, Goodwin (1992), estima la elasticidad del precio de la gasolina en -0.27 a corto plazo y a largo plazo en -0.7.

A2.3.4 Viajes en coche respecto al precio del combustible

Como se indicó anteriormente, un aumento en el precio del combustible origina una reducción del total de viajes y por ende del número de kilómetros recorridos anualmente en coche. La tabla A2.4 resume las elasticidades encontradas en el proyecto TRACE (1999), a largo plazo para varios tipos de viajes (coche-viajes, coche-kilómetros, transporte público, caminar/uso de bicicleta, *commuting*, viajes de negocios, etc.) respecto al precio del combustible bajo varias condiciones (por ejemplo, nivel de propiedad del vehículo, uso de transporte público, tipo de viaje, etc.). Las elasticidades del número de kilómetros recorridos se determinaron para áreas con alto índice de propiedad de vehículos (superior a 450 vehículos/1000 habitantes).

Tabla A2.4. Elasticidades respecto al precio del combustible. (Fuente: TRACE, 1999).

Condiciones/Propósito	Vehículo particular		Transporte público	Caminar/bicicleta
	Conductor	Pasajero		
Viajes				
<i>Commuting</i>	-0.11	+0.19	+0.20	+0.18
Negocios	-0.04	+0.21	+0.24	+0.19
Educación	-0.18	+0.00	+0.01	+0.01
Otros	-0.25	+0.15	+0.15	+0.14
Total	-0.19	+0.16	+0.13	+0.13
Kilómetros				
<i>Commuting</i>	-0.20	+0.20	+0.22	+0.19
Negocios	-0.22	+0.05	+0.05	+0.04
Educación	-0.32	+0.00	+0.00	+0.01
Otros	-0.44	+0.15	+0.18	+0.16
Total	-0.29	+0.15	+0.14	+0.13

Agras y Chapman (1999), encontraron que la elasticidad a corto plazo del coste por kilómetro recorrido respecto al precio del combustible es -0.15, mientras que a largo plazo es -0.32. También, Glaister y Graham (2000), concluyeron que la elasticidad de los viajes en vehículo con relación al precio de combustible es -0.15 en el corto plazo y -0.3 en el largo. Esto significa que un aumento del precio de combustible en 10% implica una reducción en el número de viajes del 1.5% en el corto plazo, y de un 3% en el largo plazo. Schimek (1997), encontró que la elasticidad de los viajes en vehículo respecto al precio de combustible en los USA es de -0.26. INFRAS (2000), cita estimaciones de la elasticidad a largo plazo por el uso del vehículo referente al precio del combustible en un promedio de -0.3.

A2.3.5 Peajes y road pricing

Al igual que las tarifas por estacionar, los conductores también son sensibles a pagar por el uso de la infraestructura y/o para reducir los niveles de congestión en tramos de carreteras o en determinadas áreas. Desde hace varios años se han adelantado diversas investigaciones para cuantificar dicha sensibilidad, por ejemplo en España, Matas y Raymond (2003), desarrollaron un modelo para determinar la demanda usando el enfoque de secciones cruzadas en diversos tramos de autopistas de peaje que hay en el país. Ellos encontraron que la demanda varía según ciertos factores, entre ellos la actividad económica (PIB), el turismo, el precio del combustible y las condiciones del viaje sobre todo si existen vías paralelas. En el corto plazo la elasticidad relativa al peaje se sitúa entre -0.3 y -0.83, con tendencia a valores mayores si hay presencia de autopistas paralelas sin congestión. En 1999, estos investigadores habían determinado la elasticidad respecto al peaje a corto plazo en -0.3 y a largo plazo en -0.45, señalando que en el corto plazo, los individuos responden a un aumento de precio con una disminución del número y frecuencia de viajes, una reducción de la distancia recorrida o cambiando hacia otros modos de transporte, y al aumentar el peaje el usuario opta por

desviarse hacia la carretera alternativa. A largo plazo, las alternativas abiertas son mayores, la política de precios incide en las decisiones de compra de vehículo y de localización de actividades en el espacio. Los valores más frecuentes de la elasticidad de la demanda en vías sujetas a peaje se sitúan entre -0.2 y -0.3 con un rango de variación entre -0.1 y -0.5, tal como se aprecia en la tabla A2.5.

Tabla A2.5. Elasticidad del nivel de tráfico respecto al peaje. (Fuente: Matas y Raymond, 1999).

Investigaciones	Elasticidad	Tipo de estudios
Goodwin (1988), citado en May (1992)	Valor medio -0,45	Revisión de estudios
Weustefield y Regan (1981)	Carreteras entre -0,03 y -0,31 Puentes entre -0,15 y -0,31 Valor medio -0,21	Dieciséis infraestructuras de peaje en EE.UU. (carreteras, puentes y túneles)
Ribas, Raymond y Matas (1988)	Entre -0,15 y -0,48	Tres Autopistas interurbanas en España.
Hirschman, McNight, Pucher, Paaswell y Berechman (1995)	Entre -0,09 y -0,50 Valor medio -0,25	Seis puentes y dos túneles en New Cork.
White (1984), citado en Oum, Waters y Yong (1990)	Punta -0,21 y -0,36 No punta -0,14 y -0,29	Puente en Southampton
Jones y Hervik (1992)	Oslo -0,22 Alesund -0,45	Peajes carreteras circunvalación en ciudades noruegas
Mauchan y Bonsall (1995)	Red completa autopistas -0,40 Autopistas interurbanas -0,25	Modelo de simulación para implementar un peaje en las autopistas del UK.

Holguín-Veras, Ozbay y de Cerreño (2005), investigaron la respuesta de automóviles y camiones al viajar y pagar los peajes con tecnología *E-ZPass*, donde se proporcionan descuentos por viajar en horas valle. Los resultados indican un pequeño cambio de los períodos punta hacia los períodos valle. Para el coche, las elasticidades a corto plazo en promedio estuvieron entre -0.31 y -1.97 para días laborables y para fines de semana fluctuó entre -0.55 y -1.68 dependiendo de la hora del día. Arentze, Hofman y Timmermans (2004), buscaron especificar la respuesta del viajero a los incentivos que brinda una tarifa por congestión, y encontraron que para *commuters*, se presentaban cambios con mayor probabilidad hacia la escogencia de rutas alternativas como en la hora de salida del viaje, mientras que las inclinaciones hacia el transporte público o trabajar en casa eran menos probables. Por otra parte, para no *commuters*, la mayor probabilidad de tendencia se inclinaba hacia la bicicleta. En dicho estudio se indica que la elasticidad del total de viajes relacionada con el precio está entre -0.13 y -0.19, y entre -0.35 y -0.39 para una carretera congestionada que está tarifada, teniendo en cuenta los cambios de ruta y tiempo de salida.

Luk (1999), estimó que las elasticidades de la tarifa por congestión en Singapur estaban entre -0.19 y -0.58, con un promedio de -0.34. La experiencia de Singapur es única, ya que la propiedad del coche se restringe a los residentes de altos ingresos, quienes hacen un viaje menos sensible al coste, pero esto se compensa con el excelente servicio público de la ciudad, lo cual hace que viajar en coche sea más sensible al precio que en otras ciudades.

Los impactos y beneficios de *road pricing* sobre la demanda dependen de la estructura tarifaria. May y Milne (2000), emplearon los programas SATURN y SATEASY para comparar los impactos de cuatro estructuras tarifarias: tipo cordón, y las basadas en distancia, tiempo y congestión para la red de carreteras de la ciudad Cambridge. Ellos

encontraron diferencias significativas en el funcionamiento de estas estrategias tarifarias en términos de efectividad para alcanzar un determinado nivel de tráfico. La tabla A2.6 muestra el nivel de tarifas necesario para alcanzar una reducción de viajes totales en coche, empleando una elasticidad constante de -0.5 respecto al coste generalizado del viaje. También concluyeron que la estructura tarifaria basada en tiempo, proporciona mayores beneficios sobre toda la red, seguida por la tarifación basada en distancia, luego, la basada en congestión y finalmente la estructura tipo cordón.

Tabla A2.6. Tarifa estimada para reducir el número total de viajes en la ciudad de Cambridge.
(Fuente: May y Milne, 2000).

Estructura tarifaria	Tarifa requerida para reducir el número de viajes en:		
	5% (bajo)	10% (medio)	15% (alto)
Cordón (peniques por cruzar)	21	45	90
Distancia (peniques por kilómetro)	10	20	37
Tiempo (peniques por minuto)	5	11	19
Congestión (peniques por minuto de demora)	60	200	500

A2.3.6 Tiempo de viaje

Generalmente, al acrecentarse la velocidad y reducirse las demoras se tiende a aumentar la distancia del viaje y el incremento relativo de la velocidad sobre un corredor para un modo particular tiende a atraer viajes de otros modos.

Tabla A2.7. Elasticidades respecto al tiempo de viaje en coche. (Fuente: TRACE, 1999).

Condiciones/Propósito	Vehículo particular		Transporte público	Caminar/bicicleta
	Conductor	Pasajero		
Kilómetros				
<i>Commuting</i>	-0.96	-1.02	+0.70	+0.50
Negocios	-0.12	-2.37	+1.05	+0.94
Educación	-0.78	-0.25	+0.03	+0.03
Otros	-0.83	-0.52	+0.27	+0.21
Total	-0.76	-0.60	+0.39	+0.19

En el proyecto SACTRA (1994), se concluyó que la elasticidad de la demanda respecto al tiempo de viaje es -0.5 en el corto plazo y -1.0 en el largo. Esto significa que la reducción del tiempo de viaje en un 20% sobre una carretera de uso frecuente genera un aumento del volumen de tráfico en un 10% en el largo plazo y del 20% para el largo. Goodwin (1996), determina los valores de la elasticidad de la demanda respecto al tiempo de viaje para vías urbanas en -0.27 en el corto plazo y -0.57 en el largo; mientras que, para vías interurbanas es -0.67 en el corto plazo y -1.33 para el largo.

La tabla A2.7 resume las elasticidades encontradas en el proyecto TRACE (1999), a largo plazo para varios tipos de viajes (coche-viajes, coche-kilómetros, transporte público, caminar/uso de bicicleta, *commuting*, viajes de negocios, etc.) respecto al tiempo de viaje en coche bajo varias condiciones (por ejemplo, nivel de propiedad del

vehículo, uso de transporte público, tipo de viaje, etc.). Las elasticidades del número de kilómetros recorridos concernientes al tiempo de viaje corresponden a zonas con alto índice de propiedad de vehículos (superior a 450 vehículos/1000 habitantes).

A2.3.7 Coste generalizado del viaje

Diversos investigadores en planificación del transporte han encontrado varias elasticidades para el “coste generalizado” que incluyen la combinación de los costes del tiempo de viaje, operación del vehículo, peajes, impuestos del combustible, tarifas del transporte público y precios de estacionamiento. Dichos costes se determinan generalmente de forma empírica para una comunidad específica basada en el comportamiento del viaje y datos locales provenientes de encuestas sobre el usuario. Un valor típico de la elasticidad de la demanda respecto al coste generalizado es -0.5 Smith et al. (1994), (NHI, 1995), May y Milne (2000). Booz, Allen, Hamilton (2003), estimaron el coste generalizado del viaje en la región de Canberra, Australia en -0.87 para la hora punta, -1.18 para la hora valle, y -1.02 en promedio (combinando hora punta y hora valle). Lee (2000), estimó la elasticidad del viaje en coche respecto al coste generalizado entre -0.5 y -1.0 en el corto plazo, y entre -1.0 y -2.0 en el largo.

A2.4 Conclusiones

Generalmente al hacer un cambio en el precio, cambian las decisiones de consumir el bien afectado. Dichos precios (referidos no solamente a costes monetarios, ya que puede incluir también costes no-monetarios, tales como, tiempo, inconformidad y riesgo) corresponden a los costes directos, internos, variables y percibidos que se involucran en el momento de adquirir el bien.

Al analizar las decisiones individuales estas pueden resultar variables y difíciles de predecir, pero, al trabajarse de manera grupal estas tienden a seguir un patrón predecible que indica que cuando el precio de un bien disminuye, su consumo aumenta, y cuando su precio aumenta entonces su consumo disminuye. Esto se conoce como *ley de la demanda*.

Las actividades del transporte tienden a seguir este patrón. Cuando los costes monetarios, el tiempo, la inconformidad, o el riesgo del viaje disminuyen, la movilidad (medida en viajes, pasajero-km o tonelada-km) se incrementa; y cuando los costes aumentan, entonces la movilidad se reduce. Cuando se producen cambios en el precio se origina una variedad de impactos sobre: el total de viajes que las personas realizan normalmente, su destino, la ruta, el modo, el tiempo de viaje, el tipo de vehículo (incluyendo el tamaño, la eficiencia y tipo de combustible), la localización y duración del estacionamiento y los servicios de transporte que se eligen.

La sensibilidad de la demanda referente al precio, implica que la *elasticidad* se pueda determinar de diversas maneras dependiendo de la metodología y de los contextos que se quieran examinar.

Analizando los distintos resultados de las elasticidades halladas en los diferentes tipos de costes que intervienen en la movilidad del coche, se puede deducir que ésta es *inelástica* (en términos absolutos su magnitud está entre 0 y 1) en el corto plazo, lo que significa que un cambio en el precio ocasiona una variación pequeña y proporcional sobre el número de viajes o kilómetros a recorrer.

De ahí que en esta tesis doctoral, se adopte la elasticidad-coste generalizado de la demanda como inelástica y de forma variable en función de la distancia puesto que:

- La demanda es inelástica respecto a los costes de operación cuando aumenta la distancia;
- La demanda es inelástica respecto al peaje cuando aumenta la distancia;
- La demanda es inelástica respecto al tiempo de viaje cuando aumenta la distancia;
- La magnitud de la elasticidad de la demanda respecto al coste generalizado se adopta en -0.5, estudiando la sensibilidad del modelo para los valores inelásticos de -0.3 y -0.7.

ANEXO 3

FUNCIÓN TARIFARIA PARA FAVORECER A VIAJEROS FRECUENTES

A3.1 Introducción

Este tipo de funciones, tienen como objetivo favorecer los trayectos largos que recorren diariamente los viajeros frecuentes o *commuters*. Lo que se busca es compensar el coste de la tarifa a pagar con los costes mayores del tiempo y operación que se producen en estos trayectos teniendo en cuenta la regularidad de los viajes. Así como existen descuentos según la hora del viaje, en este caso se pretende instaurar descuentos según la distancia.

La gráfica de una función es *cóncava hacia abajo* en el punto $(c, g(c))$ si existen $g'(c)$ y un intervalo abierto A que contiene a c , tal que para todos los valores de $u \neq c$ en A , el punto $(u, g(u))$ de la gráfica está debajo de la recta tangente a la gráfica en $(c, g(c))$.

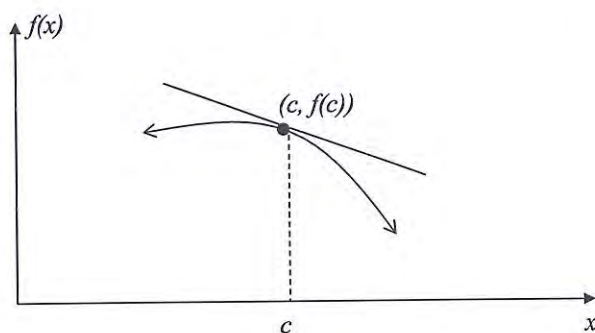


Fig. A3.1. Porción de la gráfica de una función que es cóncava hacia abajo en el punto $(c, g(c))$. (Fuente: Leithold, 1994)

Con base en la definición anterior, Leithold (1994) demuestra el teorema siguiente: Sea g una función que es diferenciable en algún intervalo abierto que contiene a c , entonces: Si $g''(c) < 0$, la gráfica de g es cóncava hacia abajo en el punto $(c, g(c))$.

A3.2 Función potencial

Con base en el teorema anterior se demuestra que la siguiente función es cóncava hasta cierto intervalo.

$$f(x) = x^a e^{x \ln^2 \theta}; \forall a > 0, \forall x \geq 0; 0 < \theta \leq 1 \quad (\text{A3.1})$$

La primera derivada de esta función es:

$$f'(x) = ax^{a-1} e^{x \ln^2 \theta} + \ln^2 \theta x^a e^{x \ln^2 \theta} \quad (\text{A3.2})$$

Al derivar nuevamente se obtiene que:

$$f''(x) = e^{x \ln^2 \theta} [a(a-1)x^{a-2} + 2ax^{a-1} \ln^2 \theta + x^a \ln^4 \theta] \quad (\text{A3.3})$$

Como $e^{x \ln^2 \theta} > 0$ entonces, $[a(a-1)x^{a-2} + 2ax^{a-1} \ln^2 \theta + x^a \ln^4 \theta] < 0$ para cumplir con la condición establecida en el teorema.

La desigualdad anterior es verdadera si y solo si:

$$x < \frac{-a \pm \sqrt{a}}{\ln^2 \theta}; \forall x \geq 0; 0 < a < 1; 0 < \theta < 1 \quad (\text{A3.4})$$

Para cumplir con la condición anterior se requiere determinar los posibles valores de a y θ para los cuales dicha función es cóncava. Para ello se determinan las siguientes fronteras empleando una hoja de cálculo:

- Si el valor de a tiende a cero y θ tiende a cero, el valor de x tiende a cero;
- Si el valor de a tiende a uno y θ tiende a cero, el valor de x tiende a cero;
- Si el valor de a tiende a cero y θ tiende a uno, el valor de x tiende a infinito;
- Si el valor de a tiende a uno y θ tiende a uno, el valor de x tiende a cero;

Estas fronteras se demuestran en la figura A3.2a. Al definir intervalos más pequeños para los valores de a y θ ($\theta > 0,99$ y $a > 0,90$) se encuentra la figura A3.2b, donde se aprecia mejor la tendencia de x con respecto a estos dos parámetros.

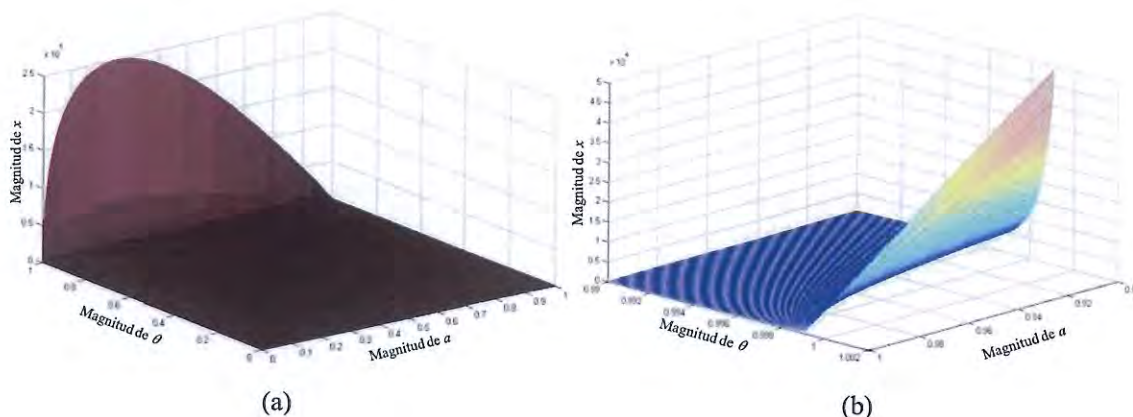


Fig. A3.2. Comportamiento de x en función de los parámetros a y θ según la ecuación A3.4.

Desde un punto de vista práctico, el valor de x representa la distancia que debe recorrer un vehículo dentro de un área metropolitana, tal como se ilustra en la tabla A3.1. Dicha distancia se ha supuesto como el diámetro aproximado.

Tabla A3.1. Datos básicos de algunas áreas metropolitanas de Europa. (Fuente: UITP, 2001).

Ciudad	Población (Miles de habitantes)	Densidad (hab/Ha)	Superficie área metropolitana (km ²)	Diámetro aprox. (km)
Athens	3.900,0	65,7	593,6	27,5
Barcelona	4.390,0	74,7	587,7	27,4
Berlin	3.390,0	54,7	619,7	28,1
Copenhagen	1.810,0	23,5	770,2	31,3
Dublin	1.120,0	25,9	432,4	23,5
Glasgow	2.100,0	29,5	711,9	30,1
Hamburg	2.370,0	33,9	699,1	29,8
Lisbon	2.680,0	27,9	960,6	35,0
London	7.170,0	54,9	1306,0	40,8
Madrid	5.420,0	55,7	973,1	35,2
Manchester	2.510,0	40,4	621,3	28,1
Milan	2.420,0	71,7	337,5	20,7
Moscow	11.400,0	161	708,1	30,0
Oslo	981,0	26,1	375,9	21,9
Paris	11.100,0	40,5	2740,7	59,1
Prague	1.160,0	44	263,6	18,3
Rome	2.810,0	62,6	448,9	23,9
Stockholm	1.840,0	18,1	1016,6	36,0
Stuttgart	2.380,0	35,3	674,2	29,3
Valencia	1.570,0	50,2	312,7	20,0
Warsaw	1.690,0	51,5	328,2	20,4

Con base en esta información se calibran los parámetros a y θ (a partir de los valores definidos $\theta > 0,99$ y $a > 0,90$) respecto al descuento que se quiera establecer según la distancia media que recorren los viajeros frecuentes. Dicho descuento se cuantifica teniendo como marco de referencia una tarifa unitaria por kilómetro de estructura lineal. La figura A3.3 muestra diferentes porcentajes de descuentos al recorrerse una distancia de 60 km.

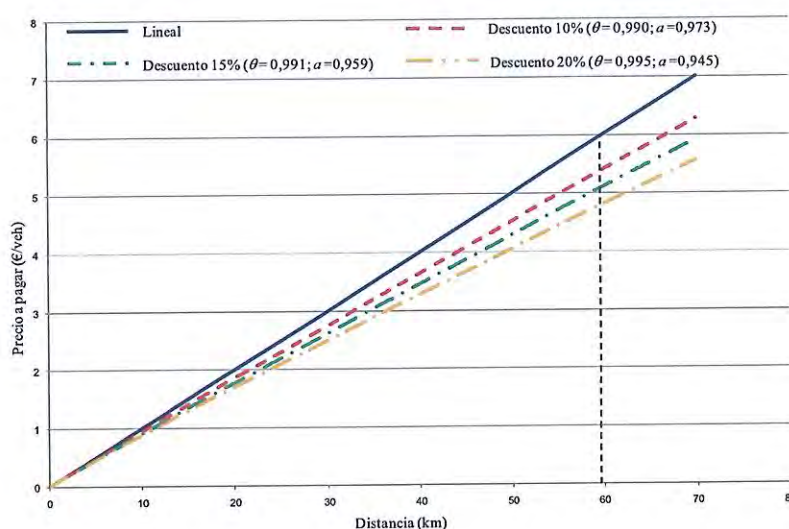


Fig. A3.2. Tarifación kilométrica Lineal vs. Cóncava. Los parámetros a y θ se calibran de acuerdo con el descuento que se quiera realizar en determinada distancia.

ANEXO 4

EJEMPLO: APLICACIÓN DE UNA ESTRUCTURA TARIFARIA COMBINADA

A continuación se presenta un ejemplo para el cálculo del par de tarifas (τ_e , τ_u) de una estructura tarifaria compuesta por una tarifa de acceso a la autopista más una tarifa por kilómetro recorrido. En este caso, la simulación se hace para una reducción de la demanda del 10% (nivel medio), empleando magnitudes para la elasticidad de -0.5 y del valor del tiempo de 9 €/veh-h. La implantación de este esquema tarifario combinado producirá infinitas combinaciones de tarifas (τ_e , τ_u) que logran cumplir con la fiabilidad del tiempo de viaje en el escenario futuro (como resultado de la disuasión de la demanda en la cantidad deseada).

A4.1 Algoritmo ejecutado empleando MATLAB

```
function Tc=tcombinada(x)%(q0,g0,e,v,t,t0,T0,n,m,Tijmin,Tijmax)
%1. FIJAR CONDICIONES INICIALES
%n=filas
%m=columnas
n=12;
m=12;
%q0: Matriz inicial de vehículos (veh/h)
q0=[0 159.14 513.40 163.49 2330.68 147.29 967.35 602.75 79.88 618.89 356.92
620.04;
132.72 0 110.19 20.02 198.16 4294.55 990.91 1823.81 1758.26 264.80 1012.43
119.71;
302.42 41.32 0 14.53 503.53 176.62 12659.31 145.45 3659.26 65.85 81.54
67.14;
87.43 108.14 30.35 0 186.62 72.49 2221.85 134.64 206.83 36.22 24.38 33.07;
104.49 289.90 10360.95 887.46 0 619.02 2728.62 80.91 74.57 72.28 23.08
13.36;
150.37 2636.05 86.21 16.45 246.76 0 1446.96 2381.87 1683.82 323.34 1469.28
132.22;
198.50 2339.67 979.74 20.95 3955.62 4082.54 0 675.32 3187.52 636.51 771.08
411.16;
1684.51 367.44 327.71 46.35 614.18 212.54 992.60 0 396.21 1040.85 1019.36
1014.80;
322.75 277.21 5698.75 750.61 316.62 201.65 1741.32 468.96 0 830.06 785.26
837.48;
```

871.55 152.42 64.57 58.97 202.52 73.35 1204.95 1335.92 274.74 0 1757.22
 3419.34;
 523.54 706.06 144.85 31.80 93.13 365.51 942.74 695.94 109.77 2271.38 0
 2183.94;
 921.43 771.12 22.73 42.93 100.32 508.52 1200.95 1413.38 199.21 3699.80
 2573.39 0];

%l: Distancias de viajes (km) (diagonal 1s)

l=[1 48.52 16.53 21.45 16.93 25.87 26.05 14.55 33.05 23.86 19.37 12.81;
 48.52 1 36.29 49.56 52.17 25.19 38.19 55.33 51.42 56.20 45.26 50.67;
 16.53 36.29 1 17.57 20.18 13.64 17.68 27.26 30.91 33.62 22.69 25.52;
 21.45 49.56 17.57 1 24.17 26.91 30.95 32.18 44.18 41.49 35.95 30.45;
 16.93 52.17 20.18 24.17 1 29.53 33.57 27.66 46.17 36.97 32.49 25.92;
 25.87 25.19 13.64 26.91 29.53 1 15.54 32.68 28.77 33.55 22.62 28.02;
 26.10 38.19 17.68 30.95 33.57 15.54 1 26.50 17.27 22.05 11.11 16.52;
 14.11 55.33 26.82 31.75 27.23 32.68 26.50 1 33.50 24.31 19.82 13.26;
 33.11 51.42 30.91 44.18 46.22 28.77 17.27 33.50 1 29.05 18.12 23.52;
 23.91 56.20 33.62 41.55 37.03 33.55 22.05 24.31 29.05 1 15.37 14.33;
 19.43 45.26 22.69 35.95 32.54 22.62 11.11 19.82 18.12 15.37 1 9.84;
 12.87 50.67 25.58 30.50 25.98 28.02 16.52 13.26 23.52 14.33 9.84 1];

%P0: Peajes (€/veh)

P0=[0 1.40 0.60 0.60 0.00 0.60 3.22 0.00 1.66 1.73 0.60 0.60;
 1.40 0 0.80 0.80 0.80 0.80 1.40 1.86 1.93 0.80 2.00;
 0.60 0.80 0 0.00 0.00 0.00 0.60 1.06 1.13 0.00 0.00;
 0.60 0.80 0.00 0 0.00 0.00 0.60 1.06 2.33 1.20 1.20;
 0.00 0.80 0.60 0.00 0 0.60 0.60 0.00 1.66 1.73 0.60 0.60;
 0.60 0.80 0.00 0.00 0.00 0 0.00 3.22 1.06 1.13 0.00 0.00;
 3.22 0.80 0.00 0.00 0.00 0.00 0 0.00 1.06 1.13 0.00 0.00;
 0.00 1.40 0.60 0.60 0.00 3.22 0.00 0 1.06 1.13 0.00 0.00;
 1.66 1.86 1.06 1.06 1.66 1.06 1.06 1.06 0 2.19 1.06 1.06;
 1.81 2.01 1.21 2.41 1.81 1.21 1.21 1.21 2.27 0 1.21 1.21;
 0.60 0.80 0.00 1.20 0.60 0.00 0.00 0.00 1.06 1.13 0 0.00;
 0.60 0.80 0.00 1.20 0.60 0.00 0.00 0.00 1.06 1.13 0.00 0];

%t0: Tiempos de viaje inicial (min)

t0=[0 39.19 11.90 14.34 9.44 22.65 28.60 11.47 32.19 13.94 15.10 7.42;
 49.24 0 40.97 50.13 49.82 29.23 56.96 58.69 64.94 61.26 56.30 54.74;
 10.63 29.65 0 11.52 11.21 13.11 29.22 20.18 37.05 22.65 23.81 16.13;
 20.14 45.94 18.65 0 19.68 29.40 45.51 29.69 50.41 32.16 33.32 25.64;
 14.03 44.73 17.44 19.42 0 28.19 40.71 23.58 44.30 26.05 27.21 19.53;
 23.40 19.00 15.13 24.29 23.98 0 29.05 32.85 37.03 35.42 30.46 28.90;
 18.94 36.71 16.59 25.75 25.44 19.03 0 21.69 14.93 15.33 9.71 13.82;
 8.22 42.33 18.20 20.64 15.74 25.79 30.27 0 33.86 15.61 16.77 9.09;
 29.05 46.96 30.34 39.50 36.57 29.28 16.27 31.80 0 25.44 19.82 23.93;
 13.22 46.10 23.20 25.64 20.74 29.56 21.33 15.97 24.92 0 7.83 8.10;
 11.48 40.52 19.14 23.90 19.00 23.98 15.75 14.23 19.34 7.87 0 6.36;
 6.80 42.39 16.78 19.22 14.32 25.85 22.86 9.55 26.45 8.20 9.36 0];

%tf: Tiempos finales (min)

tf=[0 33.04 10.47 13.14 9.01 18.75 21.25 9.40 23.28 12.70 12.07 6.82;
 36.93 0 29.88 38.31 38.42 20.68 38.27 44.41 46.40 47.57 42.02 41.82];


```

9.29 24.81 0 10.67 10.78 10.52 20.71 16.77 27.43 20.07 19.44 14.18;
15.25 36.22 13.65 0 15.74 21.93 32.11 22.73 36.61 26.02 25.39 20.14;
10.79 36.02 13.45 15.43 0 21.73 30.12 18.26 32.15 21.56 20.93 15.68;
18.05 16.70 11.00 19.42 19.53 0 18.88 25.52 27.01 28.68 23.13 22.94;
16.57 30.88 14.96 23.39 23.50 15.47 0 18.33 11.91 13.78 8.23 11.56;
7.77 36.97 16.31 18.98 14.86 22.68 22.76 0 24.79 14.21 13.58 8.33;
22.87 39.37 24.68 33.11 29.96 23.97 12.49 24.62 0 20.08 14.53 17.86;
12.57 40.15 21.12 23.79 19.66 25.86 16.94 14.33 18.96 0 7.75 7.56;
10.57 34.64 16.68 21.79 17.66 20.34 11.42 12.33 13.45 7.78 0 5.56;
6.67 37.41 15.22 17.89 13.76 23.12 16.09 8.43 18.12 7.54 6.91 0];

```

%f0: costes de operación inicial $f=0.18$ €/veh-km; f0 (€/veh)

f0=zeros(n,m);

f=0.18;

%vt0: Valor del tiempo $v=9$ €/veh-h; vt0 (€/veh)

vt0=zeros(n,m);

v=9;

%g0: Coste generalizado inicial (€/veh)

g0=zeros(n,m);

%I0: Ingresos iniciales (€/h)

I0=zeros(n,m);

%eta: Elasticidades

e=-0.5;

b=-0.1;

eta=zeros(n,m);

I0=power(1,b);

%2. OBTENCIÓN vdeltat

%vdeltat: Valor de la diferencia de tiempo final menos inicial (€/veh)

vdeltat=zeros(n,m);

for fil=1:n

for col=1:m

if fil~=col

vt0(fil,col)=(t0(fil,col)/60)*v;

f0(fil,col)=(I0(fil,col))*f;

g0(fil,col)=f0(fil,col)+vt0(fil,col)+P0(fil,col);

I0(fil,col)=P0(fil,col)*q0(fil,col);

eta(fil,col)=e*I0(fil,col);

vdeltat(fil,col)=((tf(fil,col) - t0(fil,col))/60)*v;

else

l(fil,col)=0;

end

end

end

%3. CALCULO DE MATRICES alfa, beta, ro, delta, xi, fi, gamma, teta

%alfa: $\text{veh}^2/\text{€-h}$

alfa=zeros(n,m);

%beta: veh/h

beta=zeros(n,m);

%ro: veh/h

```

ro=zeros(n,m);
%delta: €/h
delta=zeros(n,m);
beta1=zeros(n,m);
for fil=1:n
    for col=1:m
        if fil~=col
            alfa(fil,col)=(q0(fil,col)/g0(fil,col))*eta(fil,col);
            beta1(fil,col)=(eta(fil,col)*vdeltat(fil,col))/g0(fil,col);
            beta2=(eta(fil,col)*P0(fil,col))/g0(fil,col);
            beta(fil,col)=q0(fil,col)*(1+beta1(fil,col)-beta2);
            ro(fil,col)=2*beta(fil,col);
            delta(fil,col)=(vdeltat(fil,col)-
P0(fil,col))*q0(fil,col)*(2+(eta(fil,col)*vdeltat(fil,col)/g0(fil,col))-
(eta(fil,col)*P0(fil,col)/g0(fil,col)));
        end
    end
end
end
%xi: veh^2*km/€-h
xi=zeros(n,m);
%teta:(vehículos*km)^2/€-h
teta=zeros(n,m);
%fi: veh*km/h
fi=zeros(n,m);
%gamma: veh*km/h
gamma=zeros(n,m);
for fil=1:n
    for col=1:m
        if fil~=col
            xi(fil,col)=alfa(fil,col)*l(fil,col);
            teta(fil,col)=alfa(fil,col)*(l(fil,col)^2);
            fi(fil,col)=ro(fil,col)*l(fil,col);
            gamma(fil,col)=beta(fil,col)*l(fil,col);
        end
    end
end
end
%4. CÁLCULO DE PARÁMETROS TOTALES
alfat=0;
betat=0;
rot=0;
deltat=0;
xit=0;
tetat=0;
fit=0;
gammat=0;
%Q0: demanda total inicial
Q0=0;
for i=1:n

```

```

for j=1:m
  if i~=j
    alfat=alfat+alfa(i,j);
    betat=betat+beta(i,j);
    rot=rot+ro(i,j);
    deltat=deltat+delta(i,j);
    xit=xit+xi(i,j);
    tetat=tetat+teta(i,j);
    fit=fit+fi(i,j);
    gammat=gammat+gamma(i,j);
    Q0=Q0+q0(i,j);
  end
end
end

```

```
end
```

%5. CALCULO DE TARIFAS MAXIMAS SIN RESTRICCIONES

```
V=[alfat xit; xit tetat];
```

```
Z=[betat; gammat];
```

```
Wa=-0.5*inv(V)*Z;
```

```
Pea=Wa(1);
```

```
Pua=Wa(2);
```

```
%Qmin: demanda mínima para las máximas tarifas
```

```
%Itmax: recaudo máximo si se aplican tarifas máximas
```

```
%Qmin=(alfat*Pea)+(xit*Pua)+betat;
```

```
%Itmax=(alfat*Pea^2)+(xit*2*Pea*Pua)+(tetat*Pua^2)+(betat*Pea)+(gammat*Pua);
```

%6. CALCULO DE (Pe, Pu) QUE SATISFACEN LAS CONDICIONES REQUERIDAS

```
%PR: Porcentaje de reducción de tráfico
```

```
PR=0.90;
```

```
%Q1=Q0*PR;
```

```
for Pu=0:0.01:Pua
```

```
  for Pe=0:0.01:Pea
```

```
    ok1=0;
```

```
    %Primera condición a cumplir: PR
```

```
    Q1=(alfat*Pe)+(xit*Pu)+betat;
```

```
    PR1=(Q0-Q1)/Q0;
```

```
    if (((PR-0.02)<PR1) && (PR1<(PR+0.02)))
```

```
      %Se evalúa segunda condición
```

```
      i=1;
```

```
      while (i<=n)
```

```
        j=1;
```

```
        while (j<=m)
```

```
          %Verificación primer caso i=1, j=1
```

```
          if (i==1)
```

```
            j=j+1;
```

```
          end
```

```
          if (j<=m)
```

```
            g1(i,j)=(v*tf(i,j)/60)+Pe+(Pu*l(i,j));
```

```
            if g1(i,j)>=g0(i,j)
```

```
              ok1=1;
```

```
            else
```

```

        ok1=0;
    end
end %end if i~j
if (ok1==1)
    j=j+1;
else
    j=m+1;
end
end %end while j
if (ok1==1)
    i=i+1;
else
    i=n+1;
end
end %end while i
if (ok1==1)
    %evaluar tercera condicion
    ok2=0;
    i=1;
    while (i<=n)
        j=1;
        while (j<=m)
            %verificación primer caso i=1, j=1
            if (i==j)
                j=j+1;
            end
            if (j<=m)
                q1(i,j)= (alfa(i,j)*Pe)+ (xi(i,j)*Pu)+ beta(i,j);
                if (q1(i,j)<q0(i,j))
                    ok2=1;
                else
                    ok2=0;
                end
            end %end if i~j
            if (ok2==1)
                j=j+1;
            else
                j=m+1;
            end
        end %end while j
        if (ok2==1)
            i=i+1;
        else
            i=n+1;
        end
    end %end while i
    if (ok2==1)
        %Estos son los Pus y Pes que cumplen las tres cond.

```

```

%Pu
%Pe
%PR1
%Cálculo de matrices
%I1: Recaudo bruto futuro en un par O-D
%VEu: Variación del excedente de usuario
%VEp: Variación del excedente del productor
%VBs: Variación del bienestar social
q1=zeros(n,m);
Q1=0;
g1=zeros(n,m);
I1=zeros(n,m);
I1t=0;
VEu=zeros(n,m);
VEut=0;
VEp=zeros(n,m);
VEpt=0;
VBs=zeros(n,m);
VBst=0;
for i=1:n
    for j=1:m
        if i~=j
            I1(i,j)=(alfa(i,j)*Pe^2)+(2*xi(i,j)*Pe*Pu)+(teta(i,j)*Pu^2)+
(beta(i,j)*Pe)+(gamma(i,j)*Pu);
            I1t=I1t+I1(i,j);
            VEu(i,j)=0.5*((alfa(i,j)*Pe^2)+
(2*xi(i,j)*Pe*Pu)+(teta(i,j)*Pu^2)+(ro(i,j)*Pe)+(fi(i,j)*Pu)+ delta(i,j));
            VEut=VEut+VEu(i,j);
            q1(i,j)=(alfa(i,j)*Pe)+(xi(i,j)*Pu)+beta(i,j);
            Q1=Q1+q1(i,j);
            g1(i,j)=f0(i,j)+(v*tf(i,j)/60)+Pe+(Pu*I1(i,j));
            VEp(i,j)=I1(i,j)-I0(i,j);
            VEpt=VEpt+VEp(i,j);
            VBs(i,j)=VEp(i,j)-VEu(i,j);
            VBst=VBst+VBs(i,j);
        end
    end %fin del for j
end %fin del for i
%I1t
%VEut
%Q1
%VEpt
%VBst
end %fin tercera condición ok2
end %end if PR
end %end for Pe
end %End for Pu
end

```

A4.2 Procedimiento para definir los parámetros de la ecuación fundamental de un indicador

Al repetir el procedimiento anterior para otros porcentajes de reducción de la demanda, se obtienen las familias de puntos (soluciones 3D (τ_e, τ_u, z)) que evalúan un determinado indicador (z). Estas soluciones deben correlacionarse para estimar la susceptibilidad del indicador ante la variación de las tarifas, la elasticidad o del valor del tiempo. Al hacer esta correlación se halla de manera óptima los parámetros de la ecuación fundamental que define el comportamiento del indicador. La cuantificación de estos parámetros se puede hacer empleando procedimientos heurísticos tales como algoritmos genéticos o el recocido simulado o usando paquetes comerciales como el programa SPSS (software que permite realizar análisis estadísticos y tratamiento de datos).

En este trabajo se utiliza la opción de modelos de *regresión no lineal* del programa SPSS y para este ejemplo en particular, se muestran los resultados de la simulación para el indicador pérdida del excedente de usuario.

– Datos iniciales

Tabla A4.1. Datos de entrada iniciales para uso del SPSS

Resultados creados	02-MAY-2008 18:02:14
Entrada de datos	TOLL entrada+ km\SIMUL SPSS Te + km\Vt9+N-05\VEut Vt9+N-05.sav
Conjunto de datos activo	Conjunto de datos1
Filtro	<ninguno>
Peso	<ninguno>
Segmentar archivo	<ninguno>
Núm. de filas del archivo de trabajo	67
Tratamiento de los datos perdidos	Los valores perdidos definidos por el usuario se tratarán como perdidos.
Casos utilizados	Los estadísticos se basan en aquellos casos que no tienen ningún valor perdido para ninguna de las variables utilizadas. Los valores pronosticados se calculan para los casos con valores perdidos en la variable dependiente.
Sintaxis	<pre> MODEL PROGRAM ALFA=-3454 XI=-1.364 TETA=-31.94 RO=2.7571 FI=66.29 DELTA=-3.977. COMPUTE PRED_ = ALFA*x**2+100000*XI*x*y+50000*TETA*y**2+5 0000*RO*x+50000*FI*y+50000*DELTA. OUTFILE='C:\DOCUME~1\Miller\CONFIG~1\Temp \spss500\SPSSFNLR.TMP' /PRED PRED_ /CRITERIA SCONVERGENCE 1E-8 PCON 1E-8 </pre>

Tabla A4.1. (Continuación). Historial de datos de entrada iniciales y resultados del SPSS

Recursos	Tiempo transcurrido	0:00:00,01
Archivos guardados	Archivo de estimaciones de los parámetros	C:\DOCUME~1\Miller\CONFIG~1\Temp\spss500\SPSSFNLR.TMP

– Historial de iteraciones

Tabla A4.2. Historial de iteraciones (b)

Número de iteraciones(a)	Suma de cuadrados residual	Parámetro					
		XI	TETA	RO	FI	DELTA	ALFA
	ALFA						
1.0	81313213337,306	-3454,000	-1,364	-31,940	2,757	66,290	-3,977
1.1	652244846,553	6187,214	2,552	47,365	,912	29,032	-,230
2.0	652244846,553	6187,214	2,552	47,365	,912	29,032	-,230
2.1	652244846,553	6187,216	2,552	47,365	,912	29,032	-,230

Notas:

Las derivadas se calculan numéricamente.

(a) El número de iteraciones mayores se muestra a la izquierda del decimal, mientras que el número de iteraciones menores se encuentra a la derecha del decimal.

(b) La ejecución se detuvo después de 4 evaluaciones de modelos y 2 evaluaciones de derivadas, ya que la reducción relativa entre sumas residuales sucesivas de cuadrados es, como mucho, SCON = 1,00E-008.

– Estimaciones de los parámetros

Tabla A4.3. Resultados en la estimaciones de los parámetros

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95%	
	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	Límite superior
ALFA	6187,216	593,920	4989,462	7384,970
XI	2,552	,192	2,166	2,939
TETA	47,365	4,718	37,851	56,879
RO	,912	,059	,794	1,031
FI	29,032	1,173	26,666	31,397
DELTA	-,230	,070	-,370	-,089

– Correlaciones de las estimaciones de los parámetros

Tabla A4.4. Correlaciones de las estimaciones de los parámetros

	ALFA	XI	TETA	RO	FI	DELTA
ALFA	1,000	,640	,170	-,951	-,325	,636
XI	,640	1,000	,649	-,785	-,791	,787
TETA	,170	,649	1,000	-,327	-,951	,635
RO	-,951	-,785	-,327	1,000	,512	-,815
FI	-,325	-,791	-,951	,512	1,000	-,813
DELTA	,636	,787	,635	-,815	-,813	1,000

– Correlaciones de las estimaciones de los parámetros

El procedimiento ANOVA de un factor genera un análisis de varianza de un factor para una variable dependiente cuantitativa respecto a una única variable de factor (la variable independiente). El análisis de varianza se utiliza para contrastar la hipótesis de que varias medias son iguales.

Tabla A4.5. Procedimiento ANOVA (a)

Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Regresión	3571501201480,449	6	595250200246,742
Residual	652244846,553	43	15168484,804
Total sin corrección	3572153446327,002	49	
Total corregido	489697542583,960	48	

Notas:

Variable dependiente: z= Variación del excedente de usuario

(a) $R^2 = 1 - (\text{Suma de cuadrados residual}) / (\text{Suma corregida de cuadrados}) = ,999$.

A partir de los resultados de la última iteración de la tabla A4.2, se definen los parámetros de la ecuación A4.1 que define la variación de la superficie de este indicador respecto a las tarifas (τ_e , τ_u). A partir de la formulación de la ecuación se grafica en MATLAB para visualizar su comportamiento, tal como se ilustra en la figura A4.1.

$$\nabla Eu_{\tau} = \frac{1}{2} (\alpha \tau_e^2 + \xi 2 \tau_e \tau_u + \theta \tau_u^2 + \rho \tau_e + \varphi \tau_u + \delta) \quad (\text{A4.1})$$

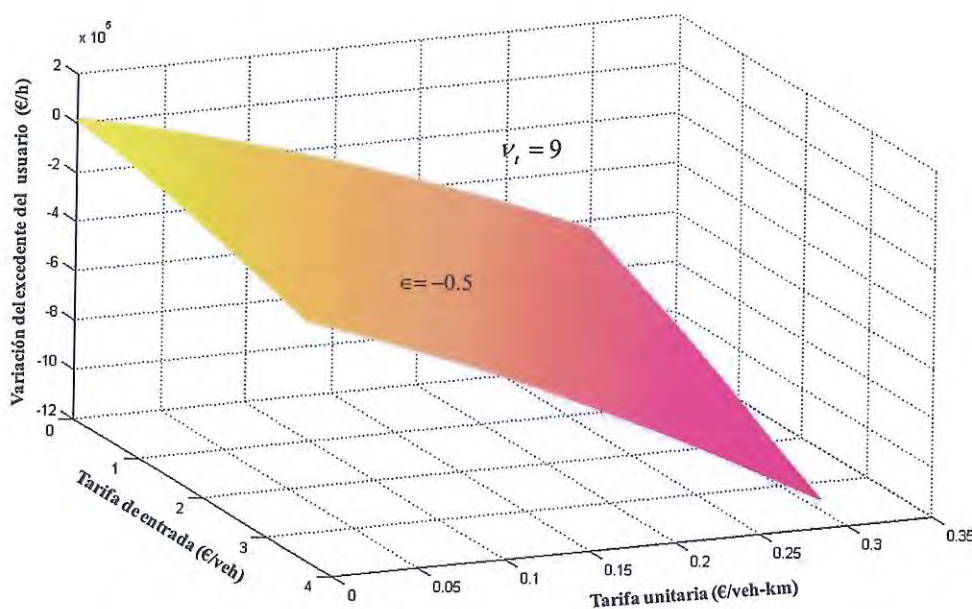


Fig. A4.1. Variación del excedente de usuario en función del par de tarifas (τ_e , τ_u).