

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 6

APLICACIÓN DEL MODELO SOBRE LA RED DE AUTOPISTAS DEL ÁREA METROPOLITANA DE BARCELONA

6.1 Introducción

La metodología presentada se puede aplicar sobre una red de carreteras congestionadas a nivel urbano o metropolitano. En este caso se ha escogido para su aplicación, la red de autopistas del Área Metropolitana de Barcelona-AMB-, que es una de las más grandes del sur de Europa. Posee una población superior a 3 millones de habitantes; una superficie de 633 km² conformada por 36 municipios; su índice de motorización es de 785 veh/1000 hab, su índice de ocupación vehicular es 1.2 pers/veh y su red de vías de gran capacidad está compuesta por autopistas libres de tarifa y tramos con autopistas de peaje, cuyo pago obedece a objetivos de financiación.

Identificados los problemas de congestión que sufren la mayoría de tramos de la red sobre todo en periodos punta, se procede a definir el escenario base representando la oferta viaria mediante un grafo con sus respectivos atributos y la valoración de la matriz de viajes inicial entre pares origen-destino, a partir de las Encuestas de Movilidad Cotidiana de los años 2001 y 2006 realizadas por la Autoridad de Transporte Metropolitano de Barcelona.

Caracterizado el escenario base, se modeliza el escenario futuro (empleando TransCAD) estableciendo como parámetro de comparación entre los distintos esquemas de *road pricing* la reducción en la matriz total del número de veh-km en diferentes niveles: bajo un 5%, medio 10% y nivel alto el 15%. El cálculo de la(s) tarifa(s) para cada estructura tarifaria que permite obtener estas disminuciones de demanda, proporcionarán la cuantificación de los efectos sobre cada uno de los indicadores establecidos en la metodología. Además, con las magnitudes de estos impactos se obtienen correlaciones que permiten determinar para cada esquema la tarifa óptima que maximiza la variación del bienestar social entre los dos escenarios.

Cuantificados los indicadores, se procede a analizar dichos resultados y su respectiva sensibilidad ante los cambios en los valores de la elasticidad y el valor del tiempo. A partir de dicha valoración y realizando un análisis multicriterio basado en una técnica de evaluación de alternativas denominado proceso de jerarquización analítica, se selecciona el esquema de *road pricing* a implantar en el AMB. Si se reduce la demanda en 11.8% con dicha estructura tarifaria se produce la mayor ganancia de bienestar al

reducirse la pérdida social y económica que produce la congestión. Además, se obtienen ingresos suficientes para cubrir el recaudo actual proveniente de la financiación de algunos tramos de autopistas en la red metropolitana analizada.

6.2 Caracterización del escenario actual

6.2.1 Planteamiento del problema

Tal como se muestra en la figura 6.1, en los últimos 15 años en la ciudad de Barcelona y su Área Metropolitana se ha incrementado notablemente el número de desplazamientos, esto ha llevado a que se mejore la accesibilidad mediante la construcción de nuevas vías, algunas de las cuales se han realizado mediante contratos de concesión. Sin embargo, esta medida no ha sido suficiente para aliviar la exigencia de una mayor y mejor movilidad direccionada sobre todo al uso del vehículo privado quién predomina respecto a los demás modos motorizados, como lo demuestra la Enquesta de Mobilitat Quotidiana de Catalunya (2006).

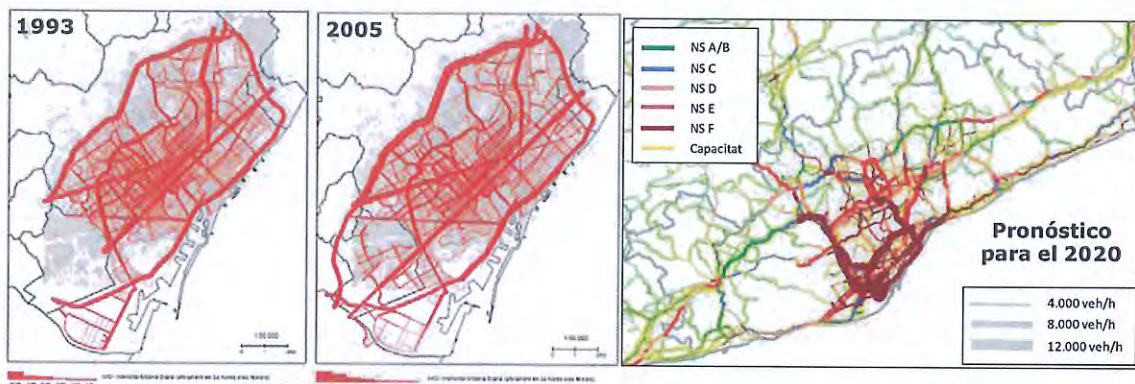


Fig. 6.1. La ejecución de nuevas vías no impide el crecimiento permanente del flujo vehicular.
(Fuente: Pla de Mobilitat Urbana de Barcelona, 2006).

La mayoría de los desplazamientos de transporte privado se efectúan en coche. En día laborable, el 67,3% de los desplazamientos en coche se realizan solamente con el conductor, mientras que el 19,6% los ejecuta con un acompañante, como se ilustra en la figura 6.2. También, se ha detectado índices de ocupación muy reducidos del orden de 1,2 pasajeros/veh.

En los periodos de horas punta de los días laborables o durante las salidas y regresos de los fines de semana o festivos, la mayoría de las autopistas que conforman la red Metropolitana de Barcelona, padecen de una gran congestión. Este problema social cobra mayor relevancia sobre la Ronda de d'alt (B-20) que circunda las poblaciones de Barcelona y L'Hospitalet, cuyas colas de vehículos de varios kilómetros hacen que se produzca estrés, ruido, contaminación y un gran número de horas perdidas de actividad laboral o de ocio. Este problema de congestión se representa en la figura 6.3, durante las horas punta de la mañana (cuando los *commuters* ingresan a Barcelona) y en la tarde cuando regresan a sus hogares.

También, los altos costes de construcción y mantenimiento, el impacto medioambiental que se produce y la escasez de territorio hacen que la creación de nuevas infraestructuras no sea el procedimiento eficaz para afrontar el permanente incremento del flujo vehicular.

| MITJA DE TRANSPORT | FEIERNER | DISSABTE I FESTIU | TOTAL SETMANAL | FEIERNER % | DISSABTE I FESTIU % | TOTAL SETMANAL % |
|----------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------|---------------------|------------------|
| Peu | 7.762.398 | 5.136.510 | 49.065.010 | 45,3 | 44,1 | 45,0 |
| Bicideta | 136.793 | 129.805 | 943.423 | 0,8 | 1,1 | 0,9 |
| Subtotal no motoritzat | 7.899.161 | 5.266.315 | 50.028.433 | 46,1% | 45,2% | 45,9% |
| Autobús urbà | 1.021.315 | 333.584 | 5.773.745 | 6,0 | 2,9 | 5,3 |
| Autobús interurbà | 218.574 | 88.831 | 1.270.533 | 1,3 | 0,8 | 1,2 |
| Total bus | 1.239.890 | 422.415 | 7.044.278 | 7,2 | 3,6 | 6,5 |
| Metro | 1.197.543 | 526.484 | 7.040.682 | 7,0 | 4,5 | 6,5 |
| Tramvia | 75.069 | 42.421 | 460.188 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| FGC | 302.374 | 89.030 | 1.689.947 | 1,8 | 0,8 | 1,6 |
| Rodalies Renfe | 402.540 | 158.970 | 2.330.639 | 2,3 | 1,4 | 2,1 |
| Autobús empresa | 49.423 | 6.038 | 259.193 | 0,3 | 0,1 | 0,2 |
| Autobús escolar | 77.117 | 1.095 | 387.776 | 0,5 | 0,0 | 0,4 |
| Autocar (excursions) | 21.558 | 48.698 | 205.186 | 0,1 | 0,4 | 0,2 |
| Taxi | 83.831 | 58.302 | 535.762 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Tren regional/Itinari recorregut | 10.147 | 13.922 | 78.578 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Avió | 13.511 | 17.569 | 102.693 | 0,1 | 0,2 | 0,1 |
| Altres | 1.032 | 1.209 | 7.580 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Subtotal Transport Públic | 3.474.036 | 1.386.161 | 20.142.500 | 20,3% | 11,9% | 18,5% |
| Cotxe com a conductor | 3.859.658 | 2.698.589 | 24.745.468 | 22,6 | 23,2 | 22,7 |
| Cotxe com a acompanyant | 1.133.595 | 2.002.183 | 9.671.891 | 6,6 | 17,2 | 8,9 |
| Moto com a conductor | 588.114 | 239.518 | 3.319.605 | 3,3 | 2,1 | 3,0 |
| Moto com a acompanyant | 35.768 | 34.186 | 247.210 | 0,2 | 0,3 | 0,2 |
| Furgoneta/camió | 141.067 | 20.571 | 746.476 | 0,8 | 0,2 | 0,7 |
| Altres | 11.501 | 6.534 | 70.575 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Subtotal Transport Privat | 5.759.613 | 5.001.581 | 38.601.224 | 33,6% | 42,9% | 35,6% |
| Total Etapes | 17.132.809 | 11.654.057 | 108.972.158 | 100% | 100% | 100,0% |

Fig. 6.2. Uso de los modos de transporte en la Región Metropolitana de Barcelona. (Fuente: Encuesta de Movilidad Quotidiana de Catalunya, EMQ 2006).

Como respuesta a este problema, en esta investigación se propone la implantación de un esquema de *road pricing* que permita gestionar las vías de gran capacidad del AMB y de esta forma originar la mayor ganancia de bienestar social (cuantificando las pérdidas sobre el excedente de los usuarios y las ganancias en cuanto a recaudación y ahorros en coste social por congestión) y la valoración sobre otros indicadores previamente definidos cuando se produce una reducción en un porcentaje determinado del número total de viajes de la matriz O-D establecida.



Fig. 6.3. Atascos en horas punta sobre la Ronda de D'alt en Barcelona (España).

6.2.2 Modelización del escenario actual

Con base en los archivos *.shp (archivos geográficos con formato de Arc View) obtenidos del Mapa de Carreteras elaborado por el Ministerio de Fomento (2005), se construye el grafo de las vías de gran capacidad empleando el software TransCAD, tal como se ilustra en la figura 6.4. Para cada uno de los arcos se han introducido sus correspondientes atributos (flujos actuales diferenciados por tipos de vehículos, velocidad y tiempo a flujo libre, capacidad y el valor del peaje actual en caso de existencia) para cada sentido.

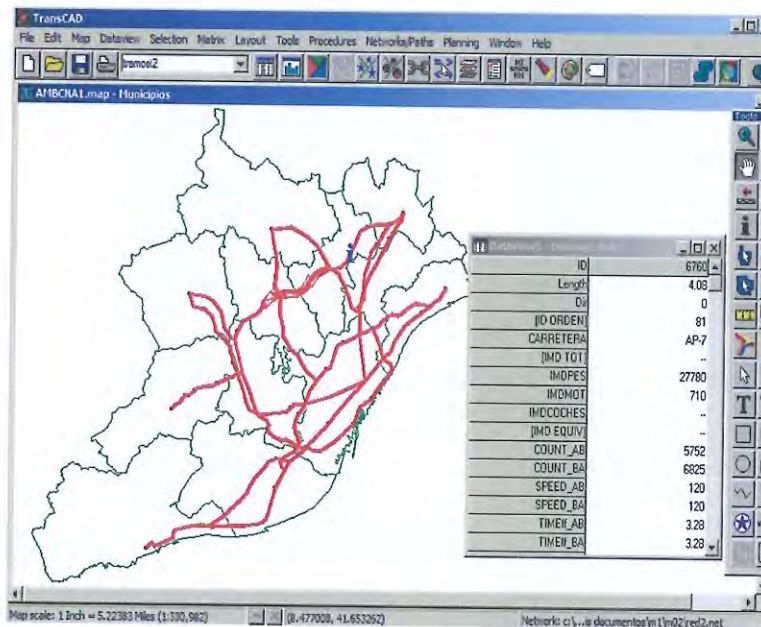


Fig. 6.4. Red de autopistas del Área Metropolitana de Barcelona con sus respectivos atributos.

La división del Área Metropolitana de Barcelona (AMB) en doce zonas se ha realizado teniendo en cuenta población, condiciones económicas, patrones de movilidad, uso del suelo, etc., de cada uno de los municipios que la conforman. La figura 6.5 muestra las cantidades de viajes atraídos y generados tanto de transporte público como de transporte privado en las diferentes entradas y salidas del AMB, los cuales provienen de la Encuesta de Movilidad Cotidiana del año 2001 realizada por la Autoridad de Transporte Metropolitano de Barcelona. Estos fueron actualizados con los datos de la EMQ 2006. Con la información anterior y usando el software TransCAD se conecta el grafo con los centroides de las zonas (a través de conectores) para generar la red que permitirá estimar la matriz de viajes origen-destino. Esta matriz de viajes contendrá el número de vehículos equivalentes que desean viajar desde una zona origen i hasta una zona destino j en la hora punta de la mañana, que es la hora que presenta mayor congestión.

La matriz de viajes origen-destino se estima empleando el método desarrollado por Nielsen (1993), y que está incorporado en TransCAD. Este método tiene la ventaja que trabaja los conteos de tráfico como variables estocásticas y por lo tanto la asignación se ha realizado empleando el método estocástico de equilibrio de usuario (SUE). El algoritmo de Nielsen consiste en un procedimiento iterativo donde el volumen de viajeros que se tienen de las mediciones de tráfico correspondientes a cada arco se

compara con los datos de salida que arroja el proceso de asignación y cuyas relaciones O-D son modificadas y complementadas para reducir progresivamente las diferencias de los datos contrastados.

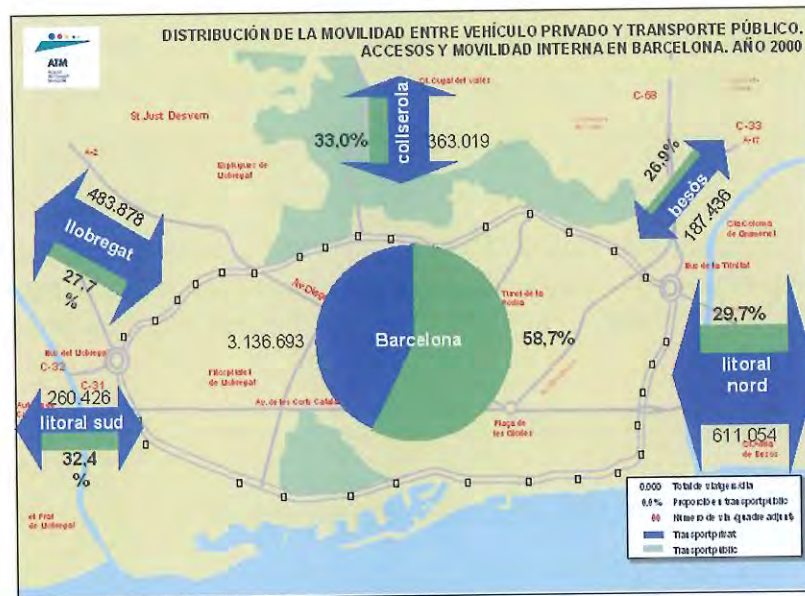


Fig. 6.5. Distribución de viajes en transporte público y privado en al AMB. (Fuente: ATM-EMQ-2001).

Los vehículos se trabajaron como flujos agregados, expresados en vehículos ligeros equivalentes. Para cualquier arco de la red establecida, la relación coste-flujo se fija permitiendo un solo valor de coste para todos los posibles movimientos que utilicen el arco en cuestión, y cuyo coste varía solamente respecto al flujo de ese arco y se actualiza de forma continua a medida que se realiza el proceso iterativo de Nielsen, explicado anteriormente. De este proceso de asignación se obtiene para el escenario base los flujos en cada arco tal como se muestra en la figura 6.6.

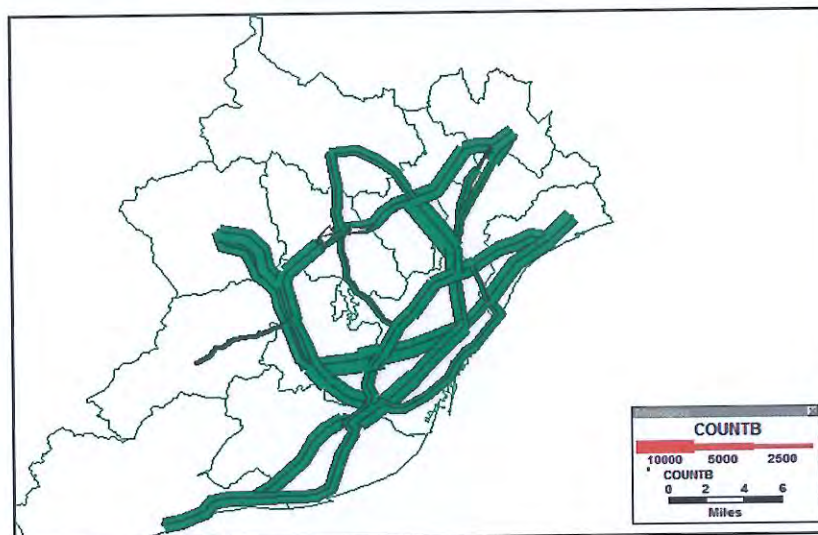


Fig. 6.6. Solución al problema de equilibrio de usuario empleando TransCAD.

Resuelto el problema de equilibrio de usuario se determinan las matrices correspondientes a cada una de las variables entre pares O-D $ij \in W$ (W es el conjunto de pares O-D de toda la red) que se emplean en el proceso de modelación, mediante un proceso de caminos mínimos (con base en la minimización del tiempo de viaje) empleando TransCAD. Dentro de las variables relevantes que intervienen en este proceso se encuentran las distancias de viaje (x_{ij}), tiempos de viaje (t_{ij}^0), peajes actuales (τ_{ij}^0) y costes de operación (f_{ij}^0). En cuanto a la matriz de mínimo coste generalizado inicial (g_{ij}^0) entre cada zona origen y cada zona destino, se cuantifica mediante la suma de los costes de operación, valor del tiempo de viaje y peaje inicial asociados a cada ruta O-D. Cada una de estas matrices generadas y almacenadas, permiten caracterizar el escenario actual sobre el cual se implantará un determinado esquema de *road pricing*.

6.3 Modelización del escenario futuro

6.3.1 Cálculo de la matriz final de viajes entre pares O-D

Modelizado el escenario actual se cargan en TransCAD la red base con los atributos de cada arco determinados anteriormente y la matriz inicial de viajes (q_{ij}^0) entre cada par O-D. La condición básica para modelar el escenario futuro es producir una reducción uniforme en un porcentaje determinado (bajo 5%, medio 10% y alto 15%) en la cantidad de veh-km que actualmente se hacen en vehículo privado. Esta disminución en el uso del coche se justifica por ser la forma efectiva de reducir tanto el efecto de la congestión como de la polución. Además, el Plan de Movilidad de Barcelona para el año 2018 busca cumplir con el protocolo de Kyoto, reduciendo el uso del vehículo particular en un 10%, aumentar el índice de ocupación, promover el transporte público y aumentar el uso de biocombustibles.

La reducción de viajes totales se hace desde TransCAD permitiendo pasar del valor inicial Q_{ij}^0 al valor final Q_{ij}^1 . Además, se obtienen para cada par O-D de la matriz el valor de q_{ij}^1 el cual servirá como parámetro de comparación cuando se determine la magnitud de la tarifa que logra esta disminución de viajes.

6.3.2 Solución al problema de equilibrio de usuario

Con base en la matriz de viajes finales (q_{ij}^1) obtenida en el paso anterior, se realiza un proceso de asignación de tráfico empleando el método SUE incorporado en TransCAD. Para poder ejecutar este proceso se requiere, previamente haber definido la función de demoras, y en este estudio se emplea la función del BPR -Bureau Public Roads-

$$t_a = t_a' \left[1 + 0.35 \left(\frac{q_a}{c_a} \right)^4 \right]$$

dependiente de los flujos de cada arco de la red. También, dentro de las restricciones por movimientos prohibidos en los nodos de la red, se

controló que los flujos no hicieran giros en U con el fin de evitar el incremento de los tiempos de viaje en una ruta determinada.

Solucionado este problema de equilibrio, TransCAD produce múltiples resultados para cada arco de la red y entre los cuales se destacan para cada dirección: los flujos (q_a^1), tiempos de viaje (t_a^1), relaciones flujo-capacidad (voc_a^1) y velocidades de viaje. Y para los dos sentidos: el flujo total, el tiempo máximo de viaje, máxima relación flujo-capacidad.

6.3.3 Obtención del escenario futuro deseado

Con base en los tiempos de viaje (t_a^1) obtenidos en el paso anterior y empleando TransCAD, se ejecuta un proceso de múltiples caminos mínimos para obtener la matriz de tiempos mínimos (t_{ij}^1) entre los diferentes pares O-D de la red. Esta matriz se contrasta con la obtenida en el escenario base, y se chequea que efectivamente los tiempos de viaje del escenario futuro deseado sean inferiores a los iniciales; es decir, se debe cumplir que: $t_{ij}^1 - t_{ij}^0 = \nabla t_{ij} < 0$.

Esta diferencia de tiempos de viaje, equivale al ahorro en demoras (es decir, en costes) que se obtendría al reducir la demanda hasta un nivel deseado. Al asegurar que la implantación de un esquema de *road pricing* permite disminuir el número de veh-km o viajes y por ende lograr este ahorro de congestión, es lo que proporciona la fiabilidad de la medida, en otras palabras, se estaría garantizando un nivel de confianza en la duración del tiempo de viaje.

Es este indicador de calidad en el servicio por el que los conductores están dispuestos a asumir el valor del peaje. Vale la pena aclarar que en este escenario futuro estipulado no se prevé la atracción de tráfico debida a la reducción de los tiempos de viaje, en el caso que esto sucediera, se incrementaría el valor del peaje para mantener el nivel de servicio deseado tal como se hace actualmente y en tiempo real.

6.4 Implantación de los diferentes esquemas tarifarios y obtención de las tarifas óptimas

Con base en los resultados generados por TransCAD en las etapas anteriores se cargan los archivos que contienen las matrices del escenario base (x_{ij} , t_{ij}^0 , τ_{ij}^0 , f_{ij}^0 , y g_{ij}^0) y la matriz de tiempos de viaje (t_{ij}^1) del escenario futuro. Junto con esta información se genera la matriz de elasticidades (η_{ij}), la cual depende de la matriz de distancias (x_{ij}).

Posteriormente, se almacenan cada una de estas matrices y basándose en la metodología descrita para cada tipo de *road pricing*, se formulan y evalúan los diferentes parámetros (α_{ij} , β_{ij} , δ_{ij} , ...) que intervienen en la cuantificación de la(s) tarifa(s) que garantizarían el nivel de servicio deseado de tráfico y la fiabilidad en la duración del tiempo de viaje.

Para cada estructura tarifaria se calculan el valor de dicha(s) tarifa(s) óptima(s) y se cuantifica la magnitud de cada uno de los indicadores a evaluar: demanda total (Q_T^1), recaudo bruto (I_T^1), excedente de usuario (Eu_T^1), tarifa promedio (τ_p^1), y tarifa unitaria media (τ_{um}^1). Estos resultados son comparados con los obtenidos en el escenario base para determinar los cambios que se producen en el excedente de usuario (∇Eu_T^1), excedente de productor (ΔEp_T^1) y del bienestar social total (ΔBs_T). La valoración de estos indicadores son tabulados para su posterior contrastación y selección del esquema de *road pricing*.

El proceso se repite pero con distintos valores de elasticidad (ϵ) de la demanda con respecto a la tarifa y del valor del tiempo (v_i) para medir la sensibilidad de cada topología tarifaria ante la variación de estos parámetros. Dentro de la bibliografía consultada existe una gran diversidad de medidas tanto para la elasticidad como para el valor del tiempo, ya que son muchas las variables que intervienen para su estimación. Para una revisión y explicación de la magnitud de estos parámetros puede consultarse VTPI (2006) y Doll y Janson (2005).

Para este trabajo, las simulaciones del modelo se han hecho con valores de elasticidad con respecto al coste generalizado (ϵ) de -0,3, -0,5 y -0,7 (con $b = -0,1$) que son coherentes con los trabajos de Matas y Raymond (2003), Santos et al. (2001), May y Milne (2000); para la magnitud del valor del tiempo (v_i) se han tomado los valores de 6, 9 y 12 €/veh-h, que son acordes a los niveles de renta de las personas y el tipo de viaje relacionado con el trabajo para el caso del Área Metropolitana de Barcelona. Para la cuantificación de los costes de operación vehicular se ha adoptado un valor de 0,18 €/veh-km.

6.4.1 Tarifa plana

En este apartado se presentan los resultados de las simulaciones al querer disminuir en los porcentajes acordados la cantidad de veh-km totales de la matriz O-D del escenario base. Inicialmente se muestra la variación de cada uno de los indicadores y se analiza su sensibilidad frente al cambio de las magnitudes de la elasticidad y del valor del tiempo.

Resultados y análisis de sensibilidad

Al revisar las consecuencias producidas por esta tipología tarifaria sobre determinadas rutas entre pares O-D, se encuentra que es bastante coercitiva cuando las distancias recorridas son cortas (en este caso, alrededor de los 15 km) pero menos disuasoria cuando las longitudes del viaje son largas.

En el caso de toda la red, la implantación de este tipo de estructura tarifaria produce los resultados que se resumen en las tablas 6.1 y 6.2, en las cuales se muestran para las diferentes reducciones de la demanda las magnitudes de los diversos indicadores para

las posibles combinaciones entre el valor del tiempo y la elasticidad de la demanda respecto al coste generalizado del viaje.

Tabla 6.1. Resultados y análisis de sensibilidad con respecto al valor del tiempo al implantarse una tarifa plana.

| INDICADORA EVALUAR | TARIFA PLANA | | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------|--------------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | 6,00 | | | 9,00 | | | 12,00 | | |
| Demanda inicial, Q^0 (* 10^5 veh-km/h) | 31,28 | | | | | | | | |
| Recaudo inicial, I^0 (* 10^5 €/h) | 0,89 | | | | | | | | |
| Elasticidad, ϵ | -0,50 | | | | | | | | |
| Valor del tiempo, τ (€/veh-h) | 6,00 | | | 9,00 | | | 12,00 | | |
| Porcentaje de disminución de demanda deseado, (%) | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% |
| Tarifa plana, τ_r (€/veh) | 1,57 | 2,58 | 3,53 | 1,81 | 3,03 | 4,17 | 2,04 | 3,47 | 4,79 |
| Demanda final, Q^1 (* 10^5 veh-km/h) | 29,71 | 28,15 | 26,59 | 29,71 | 28,15 | 26,59 | 29,71 | 28,15 | 26,59 |
| Variación de la demanda (%) | 5,02% | 10,03% | 14,99% | 5,03% | 10,02% | 15,00% | 5,02% | 10,03% | 14,99% |
| Recaudo final, I^1 (* 10^5 €/h) | 1,94 | 3,02 | 3,90 | 2,24 | 3,55 | 4,61 | 2,52 | 4,06 | 5,30 |
| Variación del recaudo, ΔI_r (* 10^5 €/h) | 1,05 | 2,13 | 3,01 | 1,35 | 2,66 | 3,72 | 1,63 | 3,17 | 4,41 |
| Tarifa promedio en toda la red, τ_p (€/veh) | 1,57 | 2,58 | 3,53 | 1,81 | 3,03 | 4,17 | 2,04 | 3,47 | 4,79 |
| Tarifa unitaria media en toda la red, τ_u (€/veh-km) | 0,08 | 0,12 | 0,16 | 0,09 | 0,14 | 0,19 | 0,10 | 0,14 | 0,19 |
| Variación del Excedente de usuario, ∇Eu (* 10^5 €/h) | 0,74 | 1,65 | 2,52 | 0,86 | 1,87 | 2,85 | 0,97 | 2,08 | 3,16 |
| Variación total del Bienestar Social, ΔBs_t (* 10^5 €/h) | 0,31 | 0,48 | 0,49 | 0,48 | 0,78 | 0,87 | 0,66 | 1,09 | 1,25 |
| Relación $\Delta Bs_t/\nabla Eu$ (%) | 42,3% | 29,1% | 19,6% | 56,1% | 41,8% | 30,4% | 67,5% | 52,3% | 39,5% |

En la tabla 6.1 se ilustra que para una misma disminución de la demanda se encuentran notables diferencias tanto en la tarifa a cobrar como en las magnitudes de los diversos indicadores al suponer un valor actual para la elasticidad de -0,5 y diferentes valores para el tiempo de viaje. Se observa que entre más se valore el tiempo mayor será el valor de la tarifa que se requiera para disuadir la misma cantidad de tráfico y por ende, las tarifas promedio y unitaria, el recaudo final, el excedente de usuario inicial total y la variación de bienestar social son superiores. Aunque resulta obvio, para un mismo valor del tiempo la disuasión de una mayor demanda requiere una mayor tarifa lo que produce mayores ingresos y pérdidas en el excedente de usuario, esto conlleva a buscar el valor máximo en la variación de bienestar, dado que a partir ese punto la variación empieza a disminuir. Tomemos el caso de disminuir un 10% la demanda y asumir que el valor actual del tiempo es de 9 €/veh-h. Si se supone que el tiempo es valorando en 12 €/veh-h implica aumentar la tarifa en 15%, mientras que si se adopta un valor de 6 €/veh-h se requiere ajustar dicha tarifa en -17%.

Al examinar el porcentaje de cambio entre el bienestar social total y la pérdida de excedente de usuario se encuentra que su valor se incrementa al valorar demasiado el tiempo para una misma disminución de la demanda. No obstante, este ratio decrece cuando se desea reducir mayor número de viajes o veh-km.

Por otro lado, la tabla 6.2 muestra la variación de las magnitudes de los distintos indicadores al emplear un valor del tiempo constante (9 €/veh-h) y hacer la demanda más o menos inelástica. Se aprecia que la tarifa es mayor cuando la demanda es más inelástica y por lo tanto las tarifas promedio y unitaria, el recaudo final, el excedente de usuario inicial total son superiores. Pero, si se adopta una demanda más elástica, las

diferencias resultan ser contrarias al caso anterior pero en menor magnitud. Por ejemplo, para un 10% de reducción de la demanda y al asumir una elasticidad actual de -0,5, si se adopta una elasticidad de -0,3 se requeriría incrementar la tarifa en 42%, mientras que si se adopta un valor de -0,7 implicaría ajustar dicha tarifa en -22%.

En cuanto a la variación de bienestar social esta permanece prácticamente igual cuando se producen reducciones de la demanda bajas o medias, pero cuando la disuasión de veh-km es alta, dicha variación es menor cuanto más inelástica sea la demanda.

Tabla 6.2. Resultados y análisis de sensibilidad con respecto a la elasticidad de la demanda al implantarse una tarifa plana.

| INDICADOR A EVALUAR | TARIFA PLANA | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | -0,30 | | | -0,50 | | | -0,70 | | |
| Demanda inicial, Q^0 (*10 ⁵ veh-km/h) | 31,28 | | | | | | | | |
| Recaudo inicial, I^0 (*10 ⁵ €/h) | 0,89 | | | | | | | | |
| Valor del tiempo, v_t (€/veh-h) | 9,0 | | | | | | | | |
| Elasticidad, ϵ | -0,30 | | | -0,50 | | | -0,70 | | |
| Porcentaje de disminución de demanda deseado, (%) | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% |
| Tarifa plana, τ_f (€/veh) | 2,44 | 4,29 | 6,07 | 1,81 | 3,03 | 4,17 | 1,54 | 2,49 | 3,36 |
| Demanda final, Q^1 (*10 ⁵ veh-km/h) | 29,72 | 28,16 | 26,59 | 29,71 | 28,15 | 26,59 | 29,71 | 28,14 | 26,58 |
| Variación de la demanda (%) | 5,01% | 10,00% | 15,01% | 5,03% | 10,02% | 15,00% | 5,04% | 10,05% | 15,02% |
| Recaudo final, I^1 (*10 ⁵ €/h) | 3,02 | 5,02 | 6,71 | 2,24 | 3,55 | 4,61 | 1,90 | 2,91 | 3,72 |
| Variación del recaudo, ΔI_t (*10 ⁵ €/h) | 2,13 | 4,13 | 5,82 | 1,35 | 2,66 | 3,72 | 1,01 | 2,02 | 2,83 |
| Tarifa promedio en toda la red, τ_p (€/veh) | 2,44 | 4,29 | 6,07 | 1,81 | 3,03 | 4,17 | 1,54 | 2,49 | 3,36 |
| Tarifa unitaria media en toda la red, τ_u (€/veh-km) | 0,12 | 0,20 | 0,28 | 0,09 | 0,14 | 0,19 | 0,07 | 0,12 | 0,15 |
| Variación del Excedente de usuario, ∇Eu (*10 ⁵ €/h) | 1,67 | 3,44 | 5,15 | 0,86 | 1,87 | 2,85 | 0,51 | 1,20 | 1,87 |
| Variación total del Bienestar Social, ΔBs_t (*10 ⁵ €/h) | 0,46 | 0,69 | 0,67 | 0,48 | 0,78 | 0,87 | 0,50 | 0,83 | 0,96 |
| Relación $\Delta Bs_t/\nabla Eu$ (%) | 27,4% | 20,1% | 13,0% | 56,1% | 41,8% | 30,4% | 97,3% | 69,2% | 51,5% |

El anterior análisis de sensibilidad permite resaltar que si se asume un error al cuantificar la magnitud de la elasticidad o del valor tiempo, la estimación del peaje no es fiable y por lo tanto tampoco lo serán los demás indicadores que dependen directamente del valor de la tarifa.

Análisis de resultados

Las siguientes figuras permiten analizar con más detalle los resultados obtenidos para la situación final de toda la red. En el caso de la figura 6.7, al considerar un valor estipulado para la elasticidad y el precio del tiempo, se establece la variación de los excedentes del productor y del usuario, así como el cambio en el bienestar social en función de la magnitud de la tarifa para las diferentes reducciones de tráfico establecidas previamente.

En ausencia de tarifas no hay pérdida de excedente de usuario, sin embargo las curvas de la variación del excedente del productor y del bienestar social parten de una magnitud negativa que equivale a los ingresos que inicialmente se perciben por concepto de financiación de algunas infraestructuras. El modelo contempla que dichos ingresos deben superarse al implantar este o cualquier otro esquema de *road pricing*

para no alterar el equilibrio económico financiero de la concesión. Se observa que a medida que se incrementa el valor de la tarifa plana, la curva del excedente de usuario va decreciendo mientras que las curvas del excedente del productor y la variación del bienestar se van incrementando de forma positiva, siendo esta última la primera en llegar a un valor máximo. Este máximo se convierte en el punto de inflexión que indica que una reducción de demanda superior a este valor ocasionará pérdidas de eficiencia en la gestión de la red.

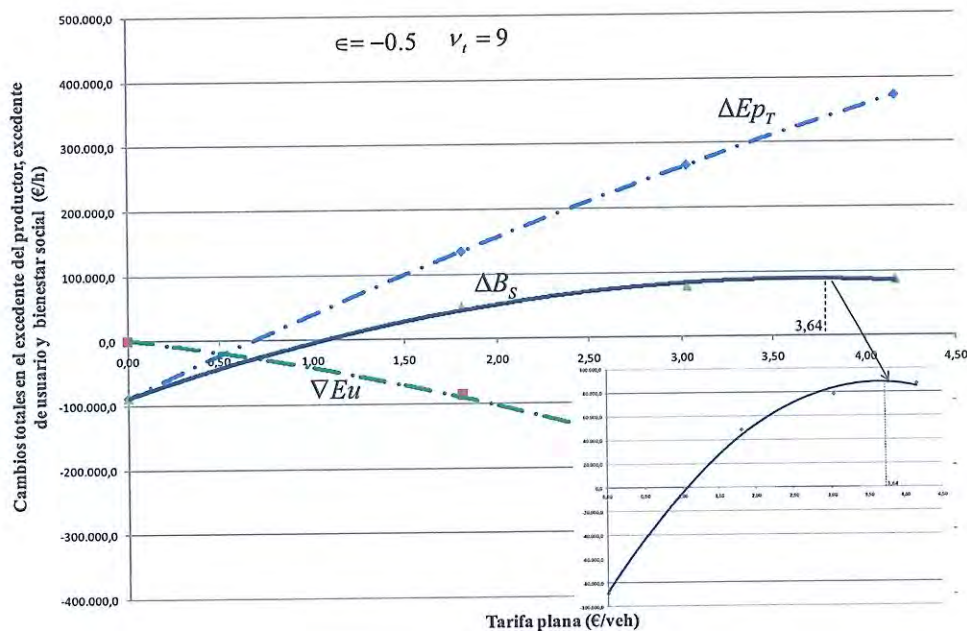


Fig. 6.7. Variación del bienestar social al implantarse una tarifa plana, definidas las magnitudes de la elasticidad y del valor del tiempo.

En este caso, al agregar la línea de tendencia que más se ajusta a los diferentes indicadores (función cuadrática), se determina que la disminución óptima de la cantidad de veh-km ($\approx 13\%$) que alcanza la máxima variación de bienestar social se obtiene aplicando una tarifa plana de 3,64 €/veh.

La figura 6.8 ilustra que para cada porcentaje de disminución de la demanda requiere aplicarse tarifas distintas dependiendo de la cuantificación acertada tanto de la elasticidad como del valor del tiempo. A mayor valoración del tiempo o cuanto más inelástica se suponga la demanda, mayor será el monto de la tarifa que se requiera para reducir la misma cantidad de viajes. Además, se señalan varias tarifas que permiten obtener la máxima variación de bienestar social para cada análisis de sensibilidad estudiada.

Dado que actualmente en el Área Metropolitana de Barcelona existen peajes en diferentes arcos de la red por motivos de financiación de las carreteras, durante el proceso de modelación se ha incluido la obtención de la variación del excedente del productor, el cual se ha definido como la variación del recaudo antes (89.263 €/h) y después de la implantación del esquema tarifario para combatir la congestión.

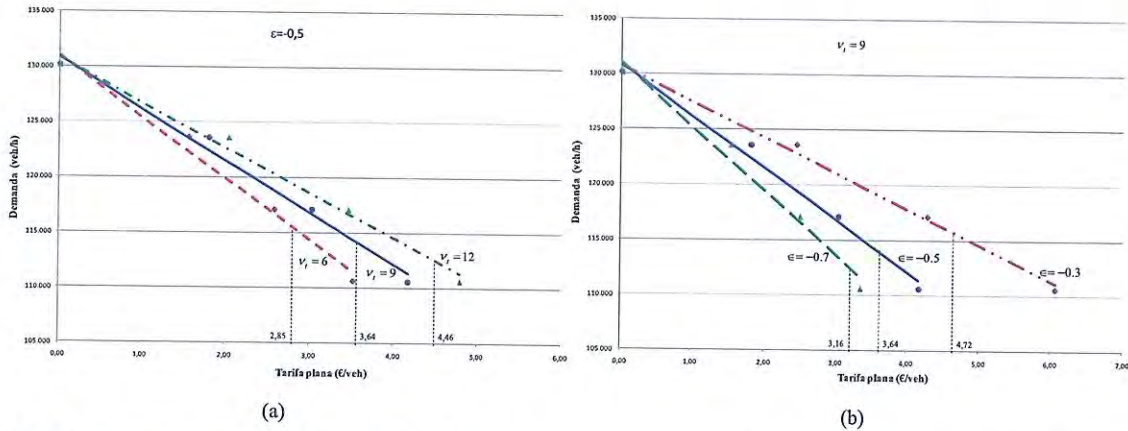


Fig. 6.8. Reducción de la demanda al implantarse una tarifa plana para diferentes magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.

Teniendo en cuenta el recaudo inicial y el deseo de disminuir la cantidad de veh-km en los porcentajes establecidos, la figura 6.9 muestra la variación del excedente del productor en función de la tarifa plana. Igual que en la figura anterior se indica que entre más inelástica se suponga la demanda o se valore mucho más el tiempo, el recaudo futuro será superior. También se demuestra que al implantar una tarifa plana superior a 0.70 €/veh entre los diferentes pares O-D de toda la red en estudio, el recaudo bruto que se produce supera considerablemente el recaudo que actualmente se obtiene.

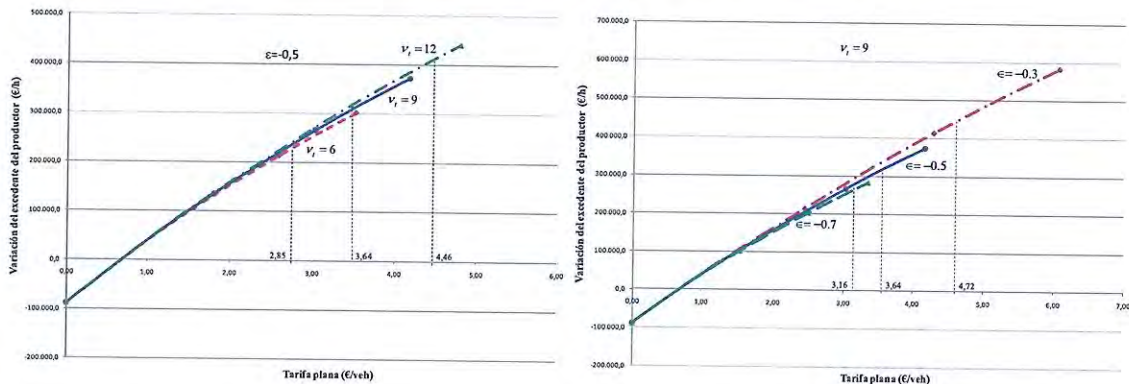


Fig. 6.9. Cambio en el excedente del productor al instaurarse una tarifa plana para diferentes valores de elasticidad y del tiempo.

La figura 6.10 ilustra la pérdida de excedente de usuario en función de la tarifa plana al querer disminuir la demanda hasta el nivel deseado. Nuevamente entre mayores sean los valores del tiempo y de la elasticidad asumidos, superiores serán las magnitudes de las pérdidas de este excedente.

La figura 6.11 presenta el cambio del bienestar social en función de la tarifa plana para los porcentajes de disminución de veh-km establecidos y los valores de las tarifas óptimas que permiten alcanzar sus valores máximos. A partir de las magnitudes encontradas para la situación inicial y las distintas disminuciones de tráfico se encuentra la curva que más se ajusta a dichos puntos (función cuadrática) tal y como se puede pronosticar en su comportamiento para mayores reducciones. La figura 6.11a ilustra que entre más se valore el tiempo la cuantificación del valor máximo de la variación del

bienestar social es mayor y requerirá una tarifa óptima mayor para su consecución. Además, se necesitará reducir mayor cantidad de demanda para obtenerlo, así para una valoración del tiempo de 6 €/veh-h se requiere una reducción del 12% para obtener la mayor variación de bienestar, mientras que si se le asigna 12 €/veh-h se precisa una disuasión del 14%.

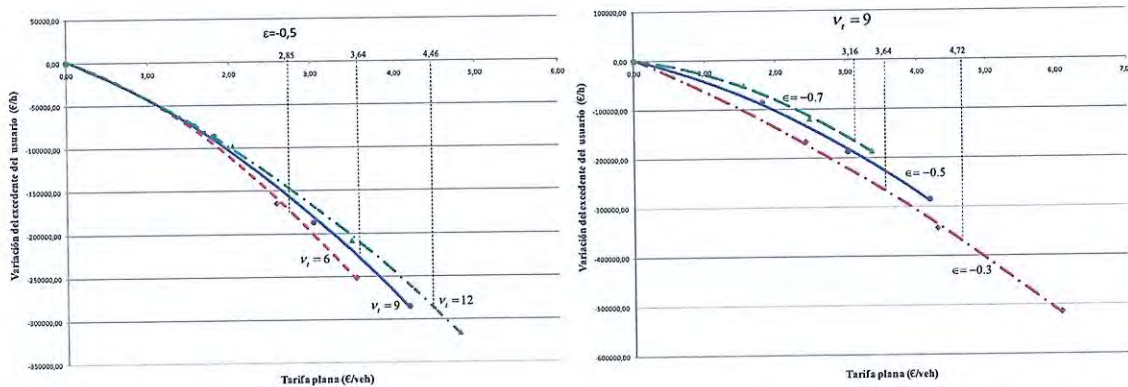


Fig. 6.10. Pérdida de excedente de usuario al instituirse una tarifa plana según la elasticidad y valor del tiempo.

Por otro lado, la figura 6.11b registra que cuando la demanda es más elástica ($\epsilon=-0,7$) la variación máxima del bienestar social se consigue para una reducción del 14% del número de veh-km, pero si es más inelástica ($\epsilon=-0,3$) dicha variación máxima es menor en magnitud y se alcanza con una reducción del 11% de la demanda, a cambio de una tarifa óptima superior.

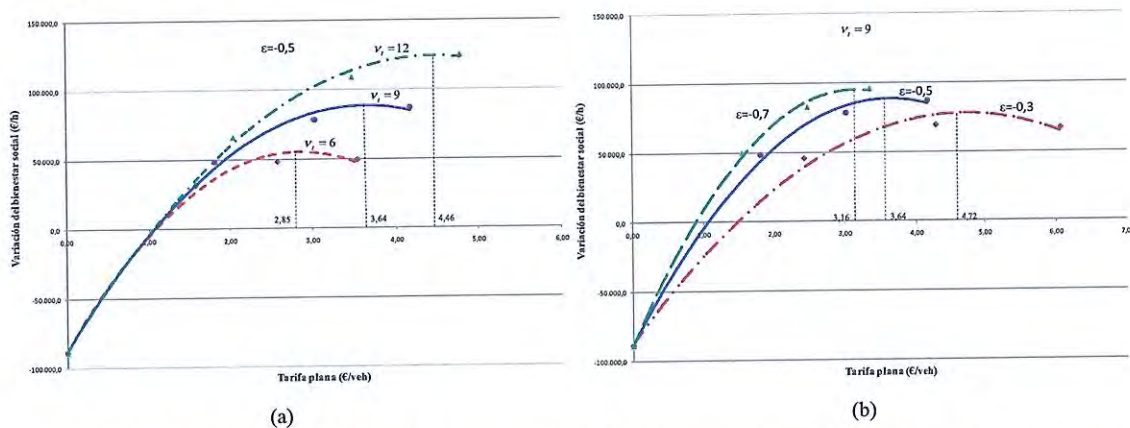


Fig. 6.11. Variación del bienestar social al implantarse una tarifa plana para diferentes magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.

6.4.2 Tarifa kilométrica lineal

Igual que en el caso anterior se presentan los resultados de las simulaciones realizadas con esta topología tarifaria al reducir la demanda total de veh-km a niveles bajo (5%), medio (10%) y alto (15%). Inicialmente se muestra la variación de cada uno de los

indicadores establecidos y se analiza su sensibilidad frente al cambio de las magnitudes de la elasticidad y del valor del tiempo.

Resultados y análisis de sensibilidad

Al revisar los efectos producidos por la implantación de este esquema de *road pricing* sobre algunas rutas específicas entre pares O-D de la red, se encuentra que es sumamente restrictivo cuando las distancias de viaje son considerables (en este caso, superior a los 15 km) pero atrae de viajes de corto recorrido que son los que fomentan la formación de colas.

Los impactos producidos sobre cada uno de los indicadores evaluados se resumen en las tablas 6.3 y 6.4, en las cuales se manifiesta que para las reducciones de la cantidad de veh-km establecidos se encuentran notables diferencias tanto en las tarifas a cobrar como en las magnitudes de los indicadores para las múltiples combinaciones realizadas entre el valor del tiempo y la elasticidad de la demanda con respecto al coste generalizado del viaje.

Tabla 6.3. Resultados y análisis de sensibilidad con respecto al valor del tiempo al implantarse una tarifa kilométrica lineal.

| INDICADOR A EVALUAR | TARIFA KILOMÉTRICA LINEAL | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|
| | 6,00 | | | 9,00 | | | 12,00 | | |
| Demanda inicial, Q^0 (*10 ⁵ veh-km/h) | 31,28 | | | | | | | | |
| Recaudo inicial, I^0 (*10 ⁵ €/h) | 0,89 | | | | | | | | |
| Elasticidad, ϵ | -0,50 | | | | | | | | |
| Valor del tiempo, v_t (€/veh-h) | 6,00 | | | 9,00 | | | 12,00 | | |
| Porcentaje de disminución de demanda deseado, (%) | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% |
| Tarifa kilométrica, τ_u (€/veh-km) | 0,08 | 0,13 | 0,18 | 0,09 | 0,15 | 0,21 | 0,11 | 0,18 | 0,24 |
| Demanda final, Q^1 (*10 ⁵ veh-km/h) | 29,67 | 28,13 | 26,49 | 29,74 | 28,23 | 26,58 | 29,50 | 28,00 | 26,63 |
| Variación de la demanda (%) | 5,17% | 10,09% | 15,34% | 4,92% | 9,78% | 15,04% | 5,69% | 10,51% | 14,87% |
| Recaudo final, I^1 (*10 ⁵ €/h) | 2,38 | 3,67 | 4,80 | 2,68 | 4,25 | 5,62 | 3,25 | 5,07 | 6,44 |
| Variación del recaudo, ΔI_t (*10 ⁵ €/h) | 1,49 | 2,78 | 3,91 | 1,79 | 3,36 | 4,73 | 2,36 | 4,18 | 5,55 |
| Tarifa promedio en toda la red, τ_p (€/veh) | 1,93 | 3,14 | 4,36 | 2,17 | 3,62 | 5,08 | 2,65 | 4,35 | 5,81 |
| Tarifa unitaria media en toda la red, τ_u (€/veh-km) | 0,08 | 0,13 | 0,18 | 0,09 | 0,15 | 0,21 | 0,11 | 0,18 | 0,24 |
| Variación del Excedente de usuario, ∇Eu (*10 ⁵ €/h) | 1,20 | 2,35 | 3,52 | 1,33 | 2,62 | 3,97 | 1,75 | 3,18 | 4,42 |
| Variación total del Bienestar Social, ΔBs_t (*10 ⁵ €/h) | 0,29 | 0,43 | 0,39 | 0,47 | 0,74 | 0,76 | 0,61 | 1,00 | 1,13 |
| Relación $\Delta Bs_t/\nabla Eu$ (%) | 24,3% | 18,3% | 11,0% | 35,2% | 28,2% | 19,2% | 35,0% | 31,4% | 25,7% |

En la tabla 6.3 se asume que el valor actual de la elasticidad es -0,5 y se resumen las simulaciones realizadas con diferentes valores del tiempo. Nuevamente se encuentra que entre más se valore el tiempo, mayor es la tarifa óptima para disuadir la misma cantidad de demanda y por lo tanto, las magnitudes de las tarifas promedio y unitaria, el recaudo final, el excedente de usuario inicial total y la variación de bienestar social son superiores. También, se encuentra que para un mismo valor del tiempo una mayor reducción de demanda requerirá una mayor tarifa unitaria y causará mayores impactos sobre los indicadores evaluados, siendo la maximización de la variación del bienestar social la que conlleve a buscar ese porcentaje óptimo de reducción. Como ejemplo se asume un valor actual del tiempo de 9 €/veh-h y se busca disminuir un 10% los veh-km.

Al adoptar un valor del tiempo de 12 €/veh-h implica incrementar la tarifa en 20%, mientras que si se asume un valor de 6 €/veh-h se requiere ajustar dicha tarifa en -15%.

En cuanto al porcentaje de cambio entre el bienestar social total y la pérdida de excedente de usuario se aprecia que su valor se incrementa al valorar demasiado el tiempo para una misma reducción de la demanda; pero, disminuye cuando se desea reducir mayor número de viajes o veh-km.

Tabla 6.4. Resultados y análisis de sensibilidad con respecto a la elasticidad de la demanda al implantarse una tarifa kilométrica lineal.

| INDICADOR A EVALUAR | TARIFA KILOMÉTRICA LINEAL | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|
| | -0,30 | | | -0,50 | | | -0,70 | | |
| Demanda inicial, Q^0 (*10 ⁵ veh-km/h) | 31,28 | | | | | | | | |
| Recaudo inicial, I^0 (*10 ⁵ €/h) | 0,89 | | | | | | | | |
| Valor del tiempo, v_t (€/veh-h) | 9,0 | | | | | | | | |
| Elasticidad, ϵ | -0,30 | | | -0,50 | | | -0,70 | | |
| Porcentaje de disminución de demanda deseado, (%) | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% |
| Tarifa kilométrica, τ_u (€/veh-km) | 0,12 | 0,22 | 0,31 | 0,09 | 0,15 | 0,21 | 0,08 | 0,13 | 0,17 |
| Demanda final, Q^1 (*10 ⁵ veh-km/h) | 29,77 | 28,07 | 26,49 | 29,74 | 28,23 | 26,58 | 29,59 | 27,92 | 26,54 |
| Variación de la demanda (%) | 4,84% | 10,27% | 15,31% | 4,92% | 9,78% | 15,04% | 5,42% | 10,75% | 15,18% |
| Recaudo final, I^1 (*10 ⁵ €/h) | 3,58 | 6,20 | 8,26 | 2,68 | 4,25 | 5,62 | 2,37 | 3,65 | 4,55 |
| Variación del recaudo, ΔI_t (*10 ⁵ €/h) | 2,69 | 5,31 | 7,37 | 1,79 | 3,36 | 4,73 | 1,48 | 2,76 | 3,66 |
| Tarifa promedio en toda la red, τ_p (€/veh) | 2,89 | 5,31 | 7,50 | 2,17 | 3,62 | 5,08 | 1,93 | 3,14 | 4,12 |
| Tarifa unitaria media en toda la red, τ_u (€/veh-km) | 0,12 | 0,22 | 0,31 | 0,09 | 0,15 | 0,21 | 0,08 | 0,13 | 0,17 |
| Variación del Excedente de usuario, ∇Eu (*10 ⁵ €/h) | 2,25 | 4,70 | 6,87 | 1,33 | 2,62 | 3,97 | 1,01 | 2,01 | 2,80 |
| Variación total del Bienestar Social, ΔBs_t (*10 ⁵ €/h) | 0,44 | 0,61 | 0,51 | 0,47 | 0,74 | 0,76 | 0,47 | 0,75 | 0,86 |
| Relación $\Delta Bs_t/\nabla Eu$ (%) | 19,6% | 12,9% | 7,4% | 35,2% | 28,2% | 19,2% | 46,4% | 37,2% | 30,6% |

La tabla 6.4 señala que para una valoración del tiempo de 9 €/veh-h y diversos supuestos de la magnitud de la elasticidad se determina que la tarifa unitaria óptima para reducir una misma cantidad de tráfico es mayor cuanto más inelástica sea la demanda y por lo tanto la tarifa promedio, tarifa unitaria media, el recaudo final, el excedente de usuario total y su variación son superiores. Por ejemplo, para un 10% de reducción de la demanda y al asumir una elasticidad actual de -0,5, si se adopta una elasticidad de -0,3 se requeriría incrementar la tarifa en 47%, mientras que si se adopta un valor de -0,7 implicaría ajustar dicha tarifa en -15%.

Al revisar la variación de bienestar social se destaca que su valoración permanece prácticamente igual cuando se producen reducciones bajas de la demanda, pero cuando la disuasión de veh-km es media o alta, la variación es menor cuanto más inelástica sea la demanda con respecto a la tarifa.

Se reconoce también que el ratio entre el cambio del bienestar social y la pérdida de excedente de usuario total se incrementa cuanto menos inelástica sea demanda, debido a la reducción del excedente de usuario inicial. Por lo tanto, el análisis de sensibilidad anterior permite resaltar que al asumir un error en la valoración de la elasticidad o del valor tiempo, la estimación del peaje no es fiable y por ende, los valores de los indicadores que dependen directamente del precio de la tarifa.

Análisis de resultados

Las siguientes figuras permiten visualizar detalladamente el comportamiento de los diferentes indicadores evaluados para toda la red frente a la variación de la tarifa unitaria kilométrica.

Escogiendo una elasticidad de $-0,5$ y un valor del tiempo de 9 €/veh-h , la figura 6.12 ilustra los cambios en la valoración de los excedentes del productor, del usuario, y del bienestar social en función de la tarifa kilométrica y las diversas reducciones de la demanda establecidas inicialmente. Al agregar las líneas de tendencia para cada indicador (relaciones cuadráticas) se encuentra que la tarifa unitaria óptima ($0,17 \text{ €/veh-km}$) que logra el valor máximo de la variación de bienestar social se consigue con una disminución del 13% del total del número total de veh-km.

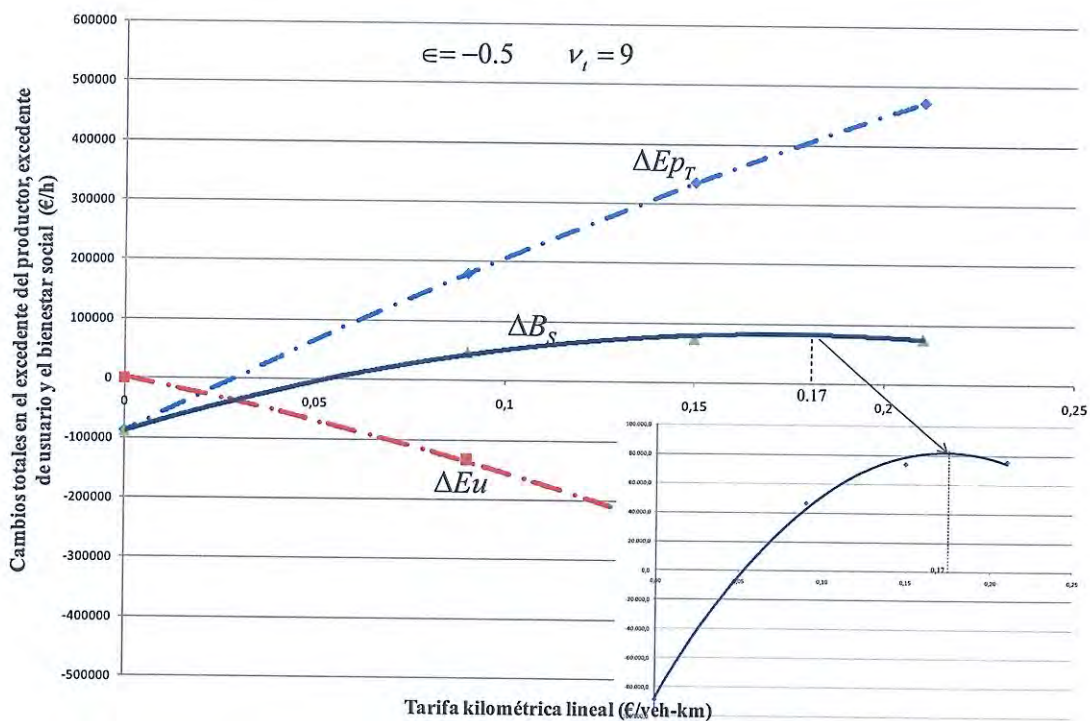


Fig. 6.12. Variación del bienestar social al implantarse una tarifa kilométrica lineal, definidas las magnitudes de la elasticidad y del valor del tiempo.

La figura 6.13 esclarece que para moderar la demanda hasta el nivel deseado pueden aplicarse diversas tarifas dependiendo de la cuantificación acertada tanto de la elasticidad como del valor del tiempo. En cuanto mayor se valore el tiempo o entre más inelástica se suponga la demanda, mayor será el monto de la tarifa a implantar para reducir una misma cantidad de veh-km. En esta misma gráfica se ilustran los valores de las tarifas que logran la maximización del bienestar dependiendo de los parámetros elasticidad y valor del tiempo.

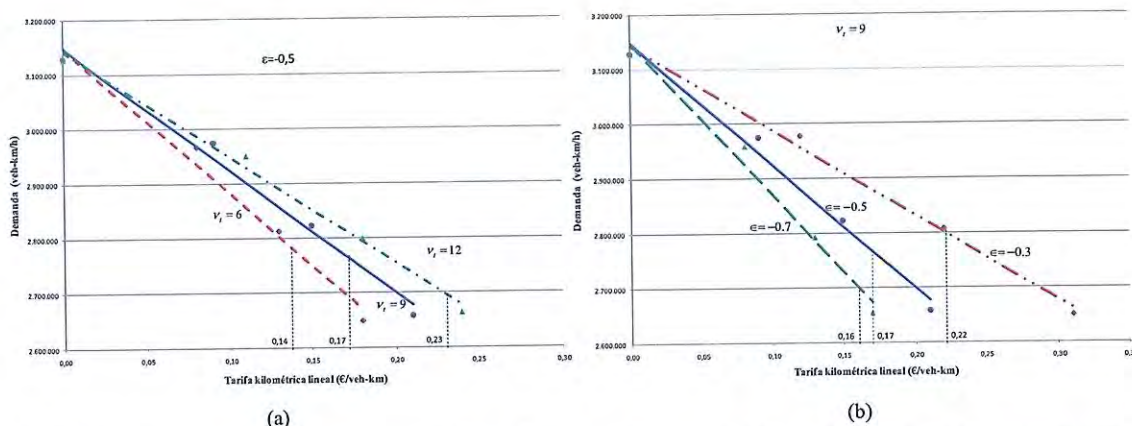


Fig. 6.13. Reducción de la demanda al implantarse una tarifa kilométrica lineal para múltiples magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.

La captación de recursos por concepto del cobro actual del peaje (contratos de concesión para financiar las autopistas) equivale a 89.263 €/h. La aplicación de este tipo de estructura tarifaria produce un cambio en el excedente del productor, el cual se manifiesta en la figura 6.14. En esta figura se aprecia que el precio de la tarifa que permite la reducción de demanda deseada produce el recaudo bruto suficiente para superar la captación inicial. También se encuentra que entre más se valore el tiempo o entre más inelástica se suponga la demanda mayor será la cantidad de recursos a obtener para una misma reducción de veh-km o para alcanzar la maximización del cambio en el bienestar social.

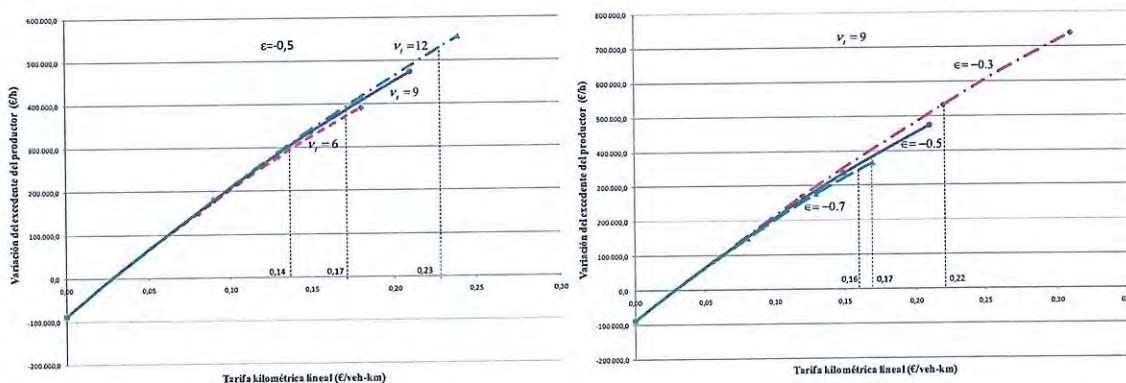


Fig. 6.14. Cambio en el excedente del productor al instaurarse una tarifa kilométrica lineal para varias magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.

La figura 6.15 ilustra la pérdida de excedente de usuario en función de la tarifa kilométrica lineal al querer obtener los diversos niveles deseados de demanda. Nuevamente, entre mayor sea el valor del tiempo o más inelástica se asuma la demanda, superiores serán las pérdidas de este excedente.

La figura 6.16 reproduce el cambio del bienestar social dependiente de la tarifa por kilómetro y señala los valores óptimos de las tarifas que permiten alcanzar los valores máximos de dicha variación. A partir de las magnitudes encontradas para la situación inicial y las distintas disminuciones de la cantidad de veh-km se encuentra la curva que

más se ajusta a tales puntos (función cuadrática) y que permite pronosticar su comportamiento para mayores reducciones.

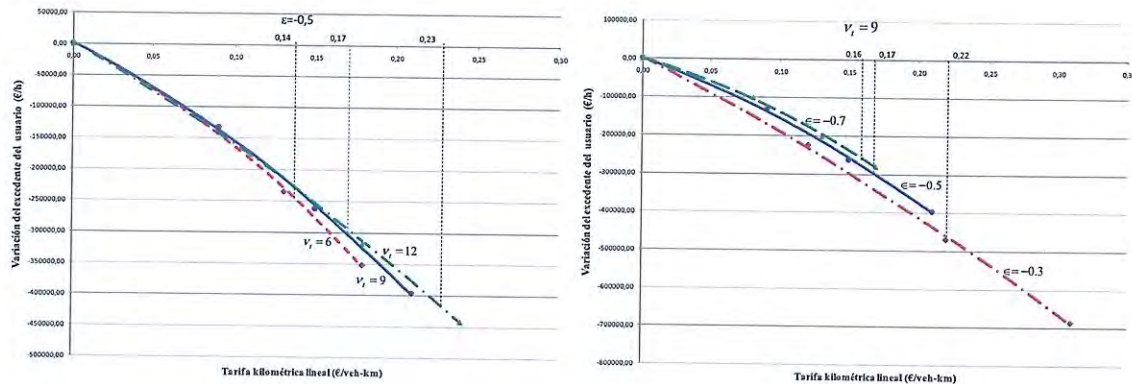


Fig. 6.15. Pérdida de excedente de usuario al instituirse una tarifa kilométrica lineal para diversas magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.

En el caso de la figura 6.16a se muestra que entre más se valore el tiempo la cuantificación del valor máximo de la variación del bienestar social es mayor y requerirá una tarifa óptima mayor para su consecución. Sin embargo, se necesitaría reducir mayor cantidad de veh-km para obtener ese máximo, así por ejemplo, para una valoración del tiempo de 6 €/veh-h se requiere una reducción del 11% para lograr la mayor variación de bienestar, mientras que si se le asigna 12 €/veh-h se precisa una disuasión de la demanda cercana al 14%.

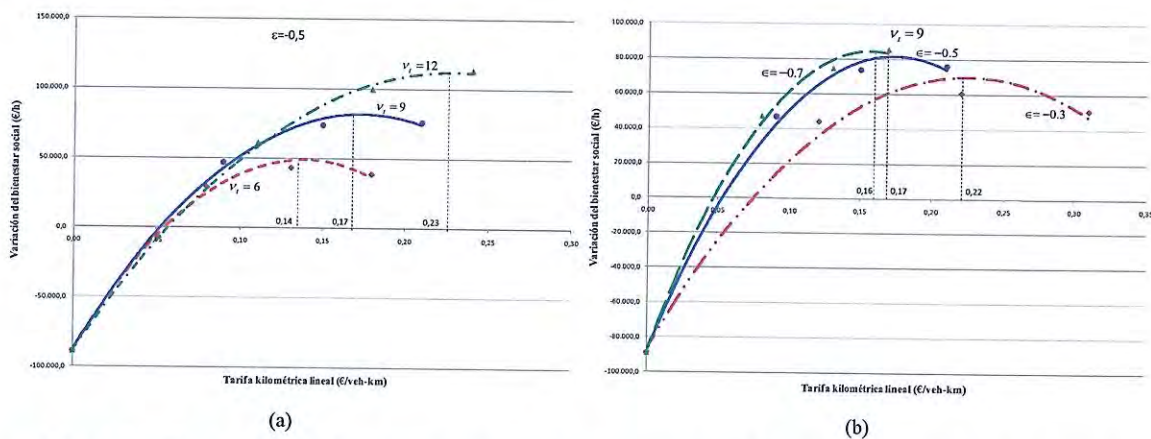


Fig. 6.16. Variación del bienestar social al implantarse una tarifa kilométrica lineal para varias magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.

Por otro lado, la figura 6.16b registra que cuando la demanda es más elástica ($\epsilon = -0,7$) la variación máxima del bienestar social se consigue para una reducción del 14% del número de viajes, pero si es más inelástica ($\epsilon = -0,3$) la variación máxima es menor en magnitud pero se alcanza con una reducción del 10% del tráfico, a cambio de una tarifa óptima superior.

6.4.3 Tarifa kilométrica cóncava

Al ser una estructura tarifaria basada en la distancia sus resultados son semejantes a la tarifa kilométrica lineal, no obstante, la diferencia fundamental radica en buscar favorecer a los *commuters* con este esquema de *road pricing* de tipo cóncavo y para ello en este estudio se ha aplicado un descuento del 20 % en el precio por recorrer cien kilómetros. Este descuento se realiza con respecto a la estructura kilométrica lineal anterior. Para cada uno de los indicadores establecidos se determina su magnitud en función de la tarifa kilométrica cóncava y se analiza su sensibilidad frente al cambio de las magnitudes de la elasticidad y del valor del tiempo.

Resultados y análisis de sensibilidad

Al revisar las secuelas generadas por este esquema tarifario sobre algunos caminos mínimos entre pares O-D, resulta que es restrictiva cuando las distancias a recorrer superan los 20 km, pero capta viajes de trayectos cortos que son los que incentivan la congestión.

Las tablas 6.5 y 6.6 resumen para toda la red, los resultados producidos sobre los diversos indicadores al aplicarse este sistema tarifario. En dichas tablas se dispone que para alcanzar las cantidades de veh-km establecidos, se requiere un nivel de tarifa que depende de la cuantificación del valor del tiempo y de la elasticidad de la demanda respecto al coste generalizado. La sensibilidad de la tarifa ante estos parámetros genera importantes discrepancias en las magnitudes de los indicadores evaluados.

Tabla 6.5. Resultados y análisis de sensibilidad con respecto al valor del tiempo al implantarse una tarifa kilométrica cóncava.

| INDICADORA EVALUAR | TARIFA KILOMÉTRICA CÓNCAVA | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|
| | 6,00 | | | 9,00 | | | 12,00 | | |
| Demanda inicial, Q^0 (*10 ⁵ veh-km/h) | 31,28 | | | | | | | | |
| Recaudo inicial, I^0 (*10 ⁵ €/h) | 0,89 | | | | | | | | |
| Elasticidad, ε | -0,50 | | | | | | | | |
| Valor del tiempo, v_t (€/veh-h) | 6,00 | | | 9,00 | | | 12,00 | | |
| Porcentaje de disminución de demanda deseado, (%) | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% |
| Tarifa kilométrica, τ_u (€/veh-km) | 0,08 | 0,14 | 0,19 | 0,10 | 0,16 | 0,22 | 0,11 | 0,19 | 0,25 |
| Demanda final, Q^1 (*10 ⁵ veh-km/h) | 29,83 | 27,99 | 26,41 | 29,59 | 28,16 | 26,60 | 29,69 | 28,00 | 26,71 |
| Variación de la demanda (%) | 5,17% | 10,09% | 15,34% | 4,92% | 9,78% | 15,04% | 5,69% | 10,51% | 14,87% |
| Recaudo final, I^1 (*10 ⁵ €/h) | 2,19 | 3,60 | 4,63 | 2,72 | 4,15 | 5,40 | 3,00 | 4,90 | 6,16 |
| Variación del recaudo, ΔI_t (*10 ⁵ €/h) | 1,30 | 2,71 | 3,74 | 1,83 | 3,26 | 4,51 | 2,11 | 4,01 | 5,27 |
| Tarifa promedio en toda la red, τ_p (€/veh) | 1,77 | 3,10 | 4,21 | 2,21 | 3,54 | 4,88 | 2,43 | 4,20 | 5,55 |
| Tarifa unitaria media en toda la red, τ_u (€/veh-km) | 0,08 | 0,14 | 0,21 | 0,10 | 0,16 | 0,24 | 0,11 | 0,20 | 0,27 |
| Variación del Excedente de usuario, ∇Eu (*10 ⁵ €/h) | 0,99 | 2,29 | 3,34 | 1,37 | 2,51 | 3,72 | 1,47 | 3,00 | 4,10 |
| Variación total del Bienestar Social, ΔBS_t (*10 ⁵ €/h) | 0,31 | 0,42 | 0,40 | 0,46 | 0,74 | 0,79 | 0,64 | 1,01 | 1,18 |
| Relación $\Delta BS_t/\nabla Eu$ (%) | 30,9% | 18,5% | 11,9% | 33,4% | 29,4% | 21,1% | 43,2% | 33,7% | 28,7% |

En el caso de que se adopte como valor actual de la elasticidad -0,5, la tabla 6.5 muestra la susceptibilidad de las diferentes magnitudes al variar el valor del tiempo. Cuanto más se valore el tiempo se requerirá una tarifa óptima mayor para disuadir la misma cantidad

de tráfico (cuya tasa de incremento es superior entre más demanda se quiera eliminar) y por consiguiente, las magnitudes de las tarifas promedio y unitaria, el recaudo final, el excedente de usuario inicial total y la variación de bienestar social son superiores. También, se encuentra que para un mismo valor del tiempo una mayor reducción de tráfico requerirá una mayor tarifa unitaria y causará mayores impactos sobre los indicadores evaluados, siendo la maximización de la variación del bienestar social la que lleve a buscar ese porcentaje óptimo de reducción. Por ejemplo al asumir un valor actual del tiempo de 9 €/veh-h y querer disminuir un 10% la demanda resulta que se debe incrementar la tarifa en 19% si se estima un valor del tiempo de 12 €/veh-h, mientras que si se adopta un valor de 6 €/veh-h se requiere ajustar dicha tarifa en -14%. En cuanto al porcentaje de cambio entre el bienestar social total y la pérdida de excedente de usuario encuentra que su valor se incrementa al valorar demasiado el tiempo para una misma disminución de la demanda; pero, se acorta cuando se desea reducir mayor número de viajes o veh-km para un mismo valor del tiempo.

Tabla 6.6. Resultados y análisis de sensibilidad con respecto a la elasticidad de la demanda al implantarse una tarifa kilométrica cóncava.

| INDICADORA EVALUAR | TARIFA KILOMÉTRICA CÓNCAVA | | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| | -0,30 | | | -0,50 | | | -0,70 | | |
| Demanda inicial, Q^0 (* 10^5 veh-km/h) | 31,28 | | | | | | | | |
| Recaudo inicial, I^0 (* 10^5 €/h) | 0,89 | | | | | | | | |
| Valor del tiempo, v_t (€/veh-h) | 9,0 | | | | | | | | |
| Elasticidad, ϵ | -0,30 | | | -0,50 | | | -0,70 | | |
| Porcentaje de disminución de demanda deseado, (%) | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% |
| Tarifa kilométrica, τ_u (€/veh-km) | 0,13 | 0,23 | 0,32 | 0,10 | 0,16 | 0,22 | 0,08 | 0,13 | 0,18 |
| Demanda final, Q^1 (* 10^5 veh-km/h) | 29,70 | 28,08 | 26,57 | 29,59 | 28,16 | 26,60 | 29,81 | 28,25 | 26,50 |
| Variación de la demanda (%) | 5,07% | 10,25% | 15,08% | 5,40% | 9,98% | 14,99% | 4,72% | 9,71% | 15,30% |
| Recaudo final, I^1 (* 10^5 €/h) | 3,54 | 5,94 | 7,83 | 2,72 | 4,15 | 5,40 | 2,19 | 3,38 | 4,40 |
| Variación del recaudo, ΔI_t (* 10^5 €/h) | 2,65 | 5,05 | 6,94 | 1,83 | 3,26 | 4,51 | 1,30 | 2,49 | 3,51 |
| Tarifa promedio en toda la red, τ_p (€/veh) | 2,87 | 5,08 | 7,09 | 2,21 | 3,54 | 4,88 | 1,77 | 2,88 | 4,00 |
| Tarifa unitaria media en toda la red, τ_u (€/veh-km) | 0,13 | 0,24 | 0,35 | 0,10 | 0,16 | 0,24 | 0,08 | 0,13 | 0,20 |
| Excedente de usuario inicial total, Eu (* 10^5 €/h) | 24,68 | 24,68 | 24,68 | 14,81 | 14,81 | 14,81 | 10,58 | 10,58 | 10,58 |
| Variación total del Bienestar Social, ΔBs_t (* 10^5 €/h) | 0,44 | 0,63 | 0,56 | 0,46 | 0,74 | 0,79 | 0,49 | 0,80 | 0,87 |
| Relación $\Delta Bs_t/\nabla Eu$ (%) | 19,8% | 14,1% | 8,8% | 33,4% | 29,4% | 21,1% | 60,5% | 47,0% | 32,8% |

La tabla 6.6 señala que para una valoración del tiempo de 9 €/veh-h y diversos supuestos de la magnitud de la elasticidad se determina que la tarifa unitaria óptima para reducir una misma cantidad de veh-km es mayor cuanto más inelástica sea la demanda y por lo tanto la tarifa promedio, tarifa unitaria media, el recaudo final, el excedente de usuario total y su variación son superiores. Por ejemplo, para un 10% de reducción de la demanda y al asumir una elasticidad actual de -0,5, si se acoge una elasticidad de -0,3 se requeriría incrementar la tarifa en 44%, mientras que si se escoge un valor de -0,7 implicaría ajustar dicha tarifa en -23%.

Al revisar la variación de bienestar social se destaca que su valoración permanece prácticamente igual cuando se producen reducciones bajas de la demanda, pero cuando la disuasión de viajes es media o alta, dicha variación es menor cuanto más inelástica sea la demanda con respecto a la tarifa.

Análisis de resultados

Las figuras siguientes permiten visualizar para toda la red la susceptibilidad de cada uno de los indicadores analizados con respecto al incremento de la tarifa por kilómetro. Para la reducción de tráfico establecida inicialmente, la figura 6.17 considera una elasticidad de $-0,5$ y el precio del tiempo en 9 €/veh-h y en ella se han elaborado las curvas de variación de los excedentes del productor, del usuario, y del bienestar social. Dichas curvas muestran que al incrementarse la tarifa unitaria se genera por un lado, una pérdida de excedente de usuario pero por el otro, una ganancia al evitarse los costes de congestión y el recaudo bruto a obtener. Analizados estos parámetros en su conjunto a través del cambio en el bienestar social se verifica que, efectivamente hay una ganancia en el bienestar cuyo valor máximo se consigue con una tarifa de $0,19 \text{ €/veh-km}$ al disuadir un 13% la actual demanda total.

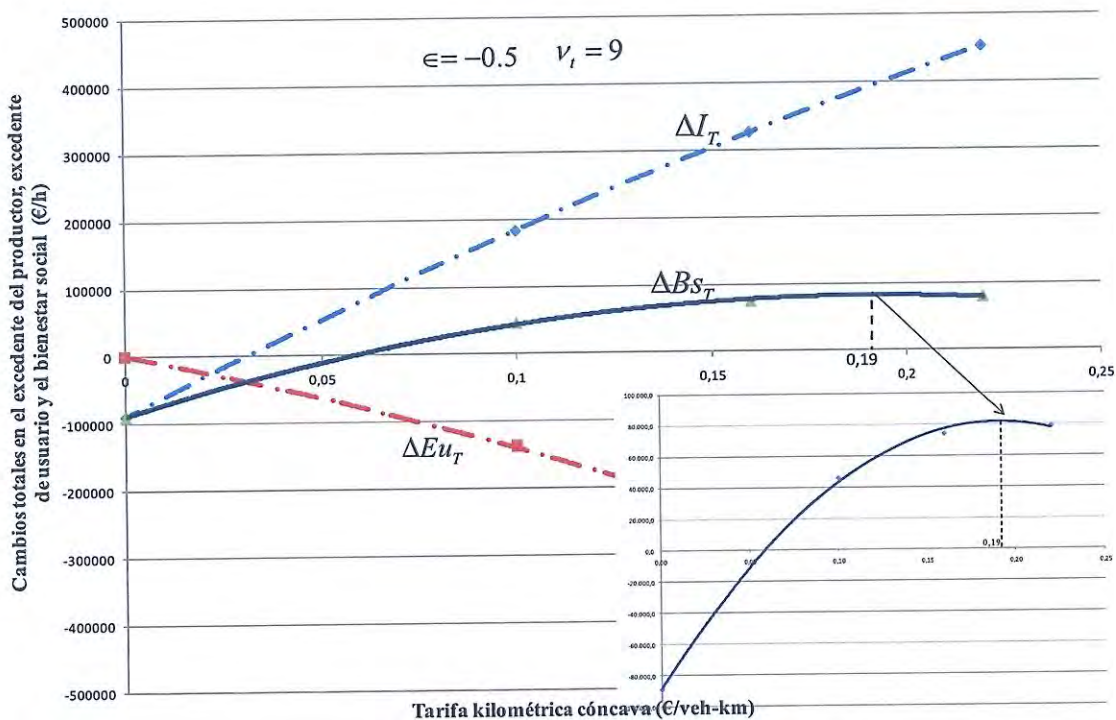


Fig. 6.17. Variación del bienestar social al implantarse una tarifa kilométrica cóncava, definidos los valores de la elasticidad y el precio del tiempo.

Para reducir la demanda hasta los niveles deseados se pueden aplicar diferentes tarifas dependiendo de la valoración acertada de la elasticidad y el valor del tiempo, tal como se muestra en la figura 6.18. Las curvas obtenidas manifiestan que entre menos se valore el tiempo o entre más elástica se suponga la demanda, menor será el nivel de tarifa que permita la obtención de la demanda estipulada. También se ilustran los valores de las tarifas que logran la maximización del bienestar.

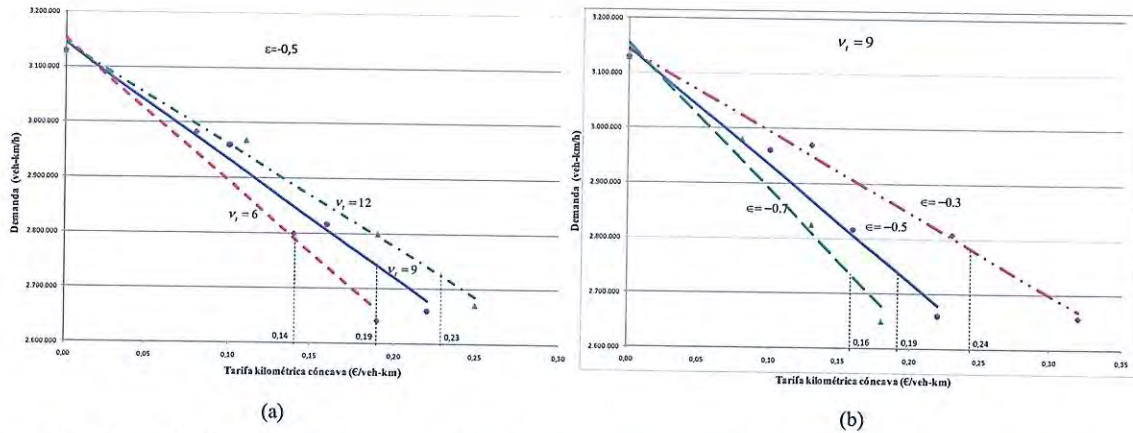


Fig. 6.18. Reducción de la demanda al implantarse una tarifa kilométrica cóncava para diversas magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.

Con respecto al cambio que se produce en el excedente del productor, la figura 6.19 muestra el incremento notable en su cuantificación al asumir una demanda muy inelástica y valores del tiempo altos. Además, se evidencia que con la implantación en toda la red de esta estructura tarifaria se obtienen recursos suficientes para cubrir los peajes que actualmente se cobran en algunos tramos de autopistas por motivos de financiación.

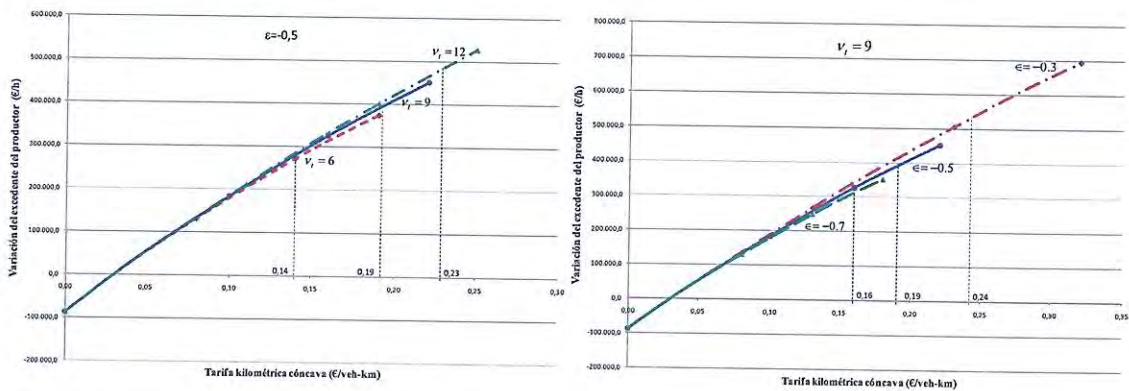


Fig. 6.19. Cambio en el excedente del productor al instaurarse una tarifa kilométrica cóncava para múltiples valores de la elasticidad y valor del tiempo.

En cuanto a la pérdida de excedente de usuario que se produce al reducir la cantidad de veh-km establecidos, la figura 6.20 ilustra la magnitud de dicha pérdida en función de la tarifa por kilómetro. Las curvas manifiestan que la pérdida de excedente será mayor si, para una elasticidad dada se incrementa el valor del tiempo o cuando la demanda se suponga más inelástica para un precio del tiempo determinado.

La figura 6.21 señala los valores óptimos de las tarifas por kilómetro que permiten alcanzar los valores máximos de la variación del bienestar social de la tarifa. A partir de las magnitudes encontradas para la situación inicial y las distintas disminuciones de la demanda se halla la curva que más se ajusta a dichos puntos (función cuadrática) que permite pronosticar su comportamiento para mayores reducciones. En el caso de la figura 6.21a se muestra que entre más se valore el tiempo la cuantificación del valor máximo de la variación del bienestar social es mayor y requiere una tarifa óptima mayor

para su consecución. Sin embargo, se necesitaría reducir mayor cantidad de veh-km para obtener ese máximo, así por ejemplo, para una valoración del tiempo de 6 €/veh-h se busca una reducción del 10% para obtener la mayor variación de bienestar, mientras que si se le asigna 12 €/veh-h se precisa una disuasión de la demanda cercana al 13%.

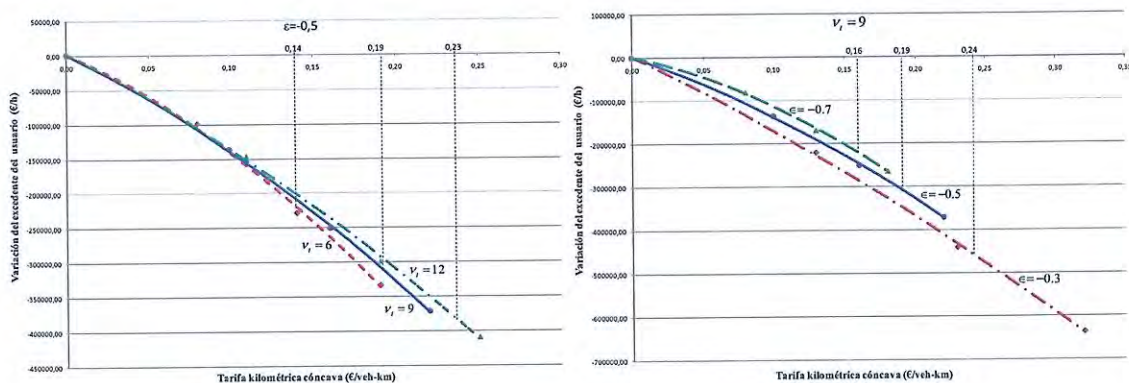


Fig. 6.20. Pérdida de excedente de usuario al instituirse una tarifa kilométrica cóncava al simular con diferentes magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.

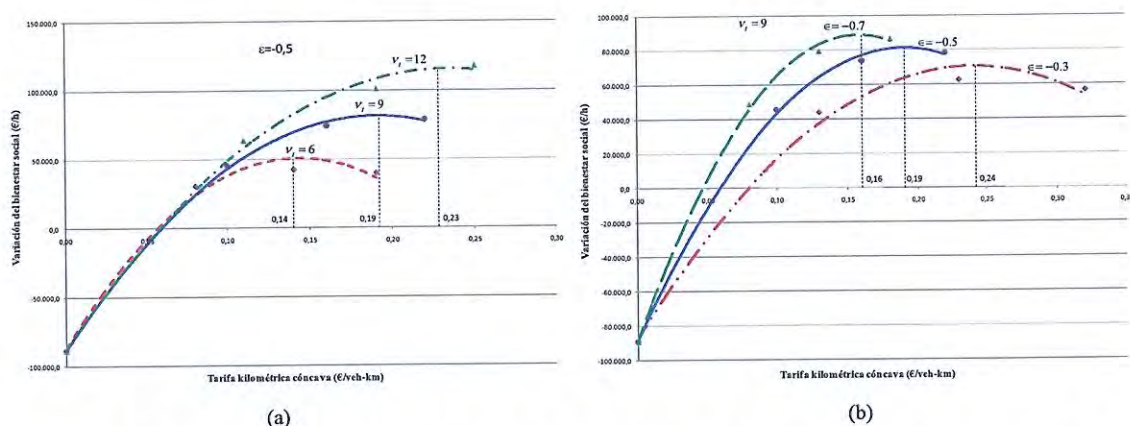


Fig. 6.21. Variación del bienestar social al implantarse una tarifa kilométrica cóncava al trabajar con diversas magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.

Ahora, al considerar un valor del tiempo de 9 €/veh-h y variar la elasticidad de la demanda se aprecia que, cuando la demanda es más elástica ($\varepsilon = -0,7$) la variación máxima del bienestar social es conseguida para una reducción del 13% del número de veh-km, pero si es más inelástica ($\varepsilon = -0,3$) tal variación máxima es menor en magnitud pero se alcanza con una reducción del 11% de la demanda, a cambio de una tarifa óptima superior.

6.4.4 Tarifa combinada: Entrada + kilométrica lineal

Este esquema complejo de tarifación consiste en cobrar a los diferentes usuarios de las autopistas metropolitanas de la red en estudio, una tarifa por acceder a ellas y posteriormente cobrarles según el número de kilómetros que recorran. Al igual que en los demás esquemas de tarifación, se busca obtener la combinación acertada de tarifas

(τ_e, τ_u) que disminuyen la cantidad de veh-km totales iniciales de la matriz O-D a niveles bajo (5%), medio (10%) y alto (15%) y posteriormente evaluar los impactos sobre cada uno de los indicadores establecidos y contrastar estos resultados con las magnitudes obtenidas en el escenario base. También, se examina la sensibilidad en la valoración de estos indicadores al variar los parámetros de la elasticidad y del valor del tiempo.

Resultados y análisis de sensibilidad

Al explorar los efectos que produce este esquema de *road pricing* sobre algunas rutas de mínimo coste entre pares O-D se encuentra que: (i) al incrementar la tarifa de acceso a la autopista y dejar una tarifa kilométrica baja, se evitan 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 se obtiene gran permisividad con los viajes cortos y se es represivo con los viajes de largo recorrido. Este segundo caso que fomenta los viajes cortos, produce una mayor cantidad de recaudo bruto pero a cambio genera mayores pérdidas de excedente de usuario para la misma cantidad de tráfico evitado.

La aplicación de esta estructura tarifaria sobre toda la red genera cambios en los distintos indicadores establecidos, los cuales se resumen en las tablas 6.7 y 6.8. Dadas las *infinitas soluciones* que se pueden establecer entre el par de tarifas (τ_e, τ_u) para disuadir una determinada cantidad de veh-km, dichas soluciones se han depurado tomando aquellas que tienen valores prácticos (es decir, las aproximadas a c€/veh o c€/veh-km), además, estas tablas se han estructurado estableciendo una tarifa por kilómetro baja y homogénea acompañada de una tarifa por acceso variable según las posibles combinaciones del valor del tiempo y la elasticidad de la demanda con respecto al coste generalizado. La susceptibilidad en la magnitud de los indicadores evaluados frente a los valores de las tarifas que disuaden el porcentaje de tráfico deseado señala la importancia de seleccionar acertadamente tanto la elasticidad como el valor del tiempo.

La tabla 6.7 ilustra el resultado de las simulaciones realizadas con una elasticidad actual de -0,5 y diferentes valores del tiempo. En ella se resalta que cuanto más se valore el tiempo mayor será la tarifa de acceso a la autopista para disuadir la misma cantidad de tráfico lo que implica que las magnitudes de las tarifas promedio y unitaria, el recaudo final, el excedente de usuario inicial total y la variación de bienestar social sean superiores. También, se determina que para un mismo valor del tiempo una mayor disminución de veh-km requerirá que las tarifas de entrada y por kilómetro sean superiores y obviamente causará mayores impactos sobre los indicadores evaluados, siendo la maximización de la variación del bienestar social la que conlleve a buscar ese porcentaje óptimo de reducción. Como ejemplo asumamos un valor actual del tiempo de 9 €/veh-h y se desea disminuir un 10% la demanda. Al suponer un valor del tiempo de 12 €/veh-h implica incrementar la tarifa de acceso en 35% para la misma tarifa unitaria. Por otro lado, si se adopta un valor de 6 €/veh-h se requiere ajustar dicha tarifa acceso en -58%.

Tabla 6.7. Resultados y análisis de sensibilidad respecto al valor del tiempo al implantarse una estructura tarifaria compuesta por una tarifa de acceso a la autopista + tarifa por kilómetro.

| INDICADOR A EVALUAR | TARIFA DE ENTRADA + KILOMÉTRICA LINEAL | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | 6,0 | | | 9,0 | | | 12,0 | | |
| Demanda inicial, Q^0 (*10 ⁵ veh-km/h) | 31,28 | | | | | | | | |
| Recaudo inicial, I^0 (*10 ⁵ €/h) | 0,89 | | | | | | | | |
| Elasticidad, ϵ | -0,50 | | | | | | | | |
| Valor del tiempo, v_t (€/veh-h) | 6,0 | | | 9,0 | | | 12,0 | | |
| Porcentaje de disminución de demanda deseado, (%) | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% |
| Tarifa de entrada, τ_e (€/veh) | 0,57 | 0,78 | 1,54 | 0,81 | 1,24 | 2,18 | 1,04 | 1,68 | 2,81 |
| Tarifa kilométrica, τ_u (€/veh-km) | 0,05 | 0,09 | 0,10 | 0,05 | 0,09 | 0,10 | 0,05 | 0,09 | 0,10 |
| Demanda final, Q^1 (*10 ⁵ veh-km/h) | 29,72 | 28,16 | 26,59 | 29,72 | 28,15 | 26,59 | 29,72 | 28,15 | 26,59 |
| Variación de la demanda (%) | 5,00% | 9,99% | 15,01% | 5,00% | 10,02% | 14,99% | 4,99% | 10,01% | 15,01% |
| Recaudo final, I^1 (*10 ⁵ €/h) | 2,20 | 3,48 | 4,42 | 2,50 | 4,02 | 5,14 | 2,79 | 4,55 | 5,85 |
| Variación del recaudo, ΔI_t (*10 ⁵ €/h) | 1,31 | 2,59 | 3,53 | 1,61 | 3,13 | 4,25 | 1,90 | 3,66 | 4,96 |
| Tarifa promedio en toda la red, τ_p (€/veh) | 1,78 | 2,97 | 4,00 | 2,02 | 3,44 | 4,65 | 2,25 | 3,88 | 5,29 |
| Tarifa unitaria media en toda la red, τ_u (€/veh-km) | 0,08 | 0,14 | 0,21 | 0,18 | 0,17 | 0,24 | 0,11 | 0,19 | 0,28 |
| Variación del Excedente de usuario, ∇Eu (*10 ⁵ €/h) | 1,01 | 2,13 | 3,07 | 1,13 | 2,37 | 3,41 | 1,24 | 2,58 | 3,73 |
| Variación total del Bienestar Social, ΔBs_t (*10 ⁵ €/h) | 0,31 | 0,46 | 0,46 | 0,48 | 0,76 | 0,84 | 0,65 | 1,07 | 1,23 |
| Relación $\Delta Bs_t/\nabla Eu$ (%) | 30,4% | 21,6% | 15,2% | 42,3% | 32,2% | 24,8% | 52,5% | 41,5% | 32,9% |

En cuanto al porcentaje de cambio entre el bienestar social total y la pérdida de excedente de usuario se encuentra que su valor se incrementa al valorar demasiado el tiempo para una misma disminución de la demanda; pero se reduce cuando se desea disminuir un número superior de veh-km.

La tabla 6.8 muestra que para una cuantificación del tiempo de 9 €/veh-h y simular diversas magnitudes de elasticidad se tiene que las tarifas de acceso y unitaria que reducen una misma cantidad de demanda son mayores cuanto más inelástica sea la demanda y por lo tanto la tarifa promedio, tarifa unitaria media, el recaudo final, el excedente de usuario total y su variación son superiores. Por ejemplo, para un 10% de rebaja de la demanda y al asumir una elasticidad actual de -0,5, si se adopta una elasticidad de -0,3 se requeriría incrementar la tarifa de acceso en un 85% y la tarifa unitaria en 11%, mientras que si se adopta un valor de -0,7 implicaría ajustar las tarifas en -39% y -12,5%, respectivamente.

En cuanto a la variación de bienestar social se destaca que su valoración permanece prácticamente igual cuando se producen bajas reducciones de la demanda, pero cuando la disuasión de veh-km es media o alta, dicha variación es menor cuanto más inelástica sea la demanda con respecto a las tarifas. En lo referente 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 deducción de la demanda; pero, decrece cuando se desea rebajar un número mayor de veh-km.

Se destaca en este análisis de sensibilidad que al asumir un error en la valoración de la elasticidad o del valor tiempo, la cuantificación de las tarifas de entrada y por kilómetro recorrido no será fiable y en consecuencia, la estimación de la magnitud de los diversos indicadores que dependen de estas tarifas serían erróneas.

Tabla 6.8. Resultados y análisis de sensibilidad con respecto a la elasticidad al implantarse una estructura tarifaria compuesta por una tarifa de acceso a la autopista + tarifa por kilómetro.

| INDICADOR A EVALUAR | TARIFA DE ENTRADA + KILOMÉTRICA LINEAL | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|
| | Demanda inicial, Q^0 (*10 ⁵ veh-km/h) | 31,28 | | | | | | | |
| Recaudo inicial, I^0 (*10 ⁵ €/h) | 0,89 | | | | | | | | |
| Valor del tiempo, v_t (€/veh-h) | 9,0 | | | | | | | | |
| Elasticidad, ε | -0,3 | | | -0,5 | | | -0,7 | | |
| Porcentaje de disminución de demanda deseado, (%) | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% |
| Tarifa de entrada, τ_e (€/veh) | 1,05 | 2,30 | 3,68 | 0,81 | 1,24 | 2,18 | 0,54 | 0,89 | 1,37 |
| Tarifa kilométrica, τ_u (€/veh-km) | 0,07 | 0,10 | 0,12 | 0,05 | 0,09 | 0,10 | 0,05 | 0,08 | 0,10 |
| Demanda final, Q^1 (*10 ⁵ veh-km/h) | 29,72 | 28,16 | 26,59 | 29,72 | 28,15 | 26,59 | 29,72 | 28,16 | 26,59 |
| Variación de la demanda (%) | 5,01% | 9,99% | 15,00% | 5,00% | 10,02% | 14,99% | 5,00% | 9,98% | 15,02% |
| Recaudo final, I^1 (*10 ⁵ €/h) | 3,39 | 5,55 | 7,34 | 2,50 | 4,02 | 5,14 | 2,17 | 3,33 | 4,24 |
| Variación del recaudo, ΔI_t (*10 ⁵ €/h) | 2,50 | 4,66 | 6,45 | 1,61 | 3,13 | 4,25 | 1,28 | 2,44 | 3,35 |
| Tarifa promedio en toda la red, τ_p (€/veh) | 2,75 | 4,74 | 6,64 | 2,02 | 3,44 | 4,65 | 1,75 | 2,84 | 3,84 |
| Tarifa unitaria media en toda la red, τ_u (€/veh-km) | 0,13 | 0,24 | 0,35 | 0,09 | 0,17 | 0,24 | 0,08 | 0,14 | 0,20 |
| Variación del Excedente de usuario, ∇Eu (*10 ⁵ €/h) | 2,05 | 3,99 | 5,80 | 1,13 | 2,37 | 3,41 | 0,79 | 1,63 | 2,42 |
| Variación total del Bienestar Social, ΔBs_t (*10 ⁵ €/h) | 0,45 | 0,68 | 0,65 | 0,48 | 0,76 | 0,84 | 0,49 | 0,81 | 0,93 |
| Relación $\Delta Bs_t/\nabla Eu$ (%) | 21,9% | 17,0% | 11,2% | 42,3% | 32,2% | 24,8% | 62,6% | 49,5% | 38,2% |

Análisis de resultados

Revisar el comportamiento de cada uno de los indicadores ante el cambio de las tarifas de entrada y por kilómetro y su susceptibilidad a las magnitudes de la elasticidad y del valor del tiempo, se convierte en un proceso complejo dado el análisis tridimensional que esto implica. Al establecer como parámetro de comparación entre los distintos esquemas de *road pricing* la reducción en la matriz total del número de veh-km en los niveles bajo (5%), medio (10%) y alto (15%), y ya que cada una de las formulaciones que modeliza y evalúa a cada indicador lo hace para una determinada reducción de veh-km, la implantación de este esquema tarifario combinado producirá infinitas combinaciones de tarifas (τ_e , τ_u) que logran cumplir con la fiabilidad de este tiempo de viaje en el escenario futuro (como resultado de la disuasión de la demanda en la cantidad deseada).

Por lo tanto, para evaluar un determinado indicador (z) se obtienen tres familias de puntos (soluciones 3D (τ_e , τ_u , z)) que logran una reducción de la demanda, las cuales deben correlacionarse y ajustarse a la función original que las produjo. Para ello se empleó la opción de modelos de regresión lineal y no lineal del programa SPSS (software que permite realizar análisis estadísticos y tratamiento de datos). Inicialmente, se definen las variables dependientes e independientes y se introducen todas las magnitudes obtenidas de los efectos que se producen en cada indicador junto con la ecuación que los ha producido y sus correspondientes parámetros iniciales, con los cuales se le indica al programa que encuentre los parámetros generales de la correlación después de la convergencia. En el Anexo 4 se ilustra un ejemplo del procedimiento empleado para obtener el comportamiento de un indicador ante la variación de las tarifas (τ_e , τ_u).

Encontrados los parámetros que definen la superficie del comportamiento de cada indicador con respecto al par de tarifas (τ_e, τ_u) se procede a graficarlas empleando MATLAB. Tales figuras permiten visualizar para toda la red, la sensibilidad de cada uno de los indicadores analizados con respecto al incremento tanto de la tarifa por kilómetro como de la tarifa de entrada a la autopista.

Inicialmente se graficaron las superficies de la pérdida del excedente de usuario, la variación excedente del productor y el cambio en el bienestar social considerando una elasticidad de $-0,5$ y el precio del tiempo de 9 €/veh-h . Estas superficies que se muestran en la figura 6.22, representan el comportamiento de estos indicadores ante las infinitas combinaciones del par de tarifas (τ_e, τ_u) . Además, se aprecia que cuando 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) y a medida que se van incrementando se refleja la ganancia esperada en el excedente del productor así como la pérdida creciente en el excedente de usuario lo cual conduce a que la superficie de la variación del bienestar social señale valores máximos para múltiples combinaciones del par de tarifas.

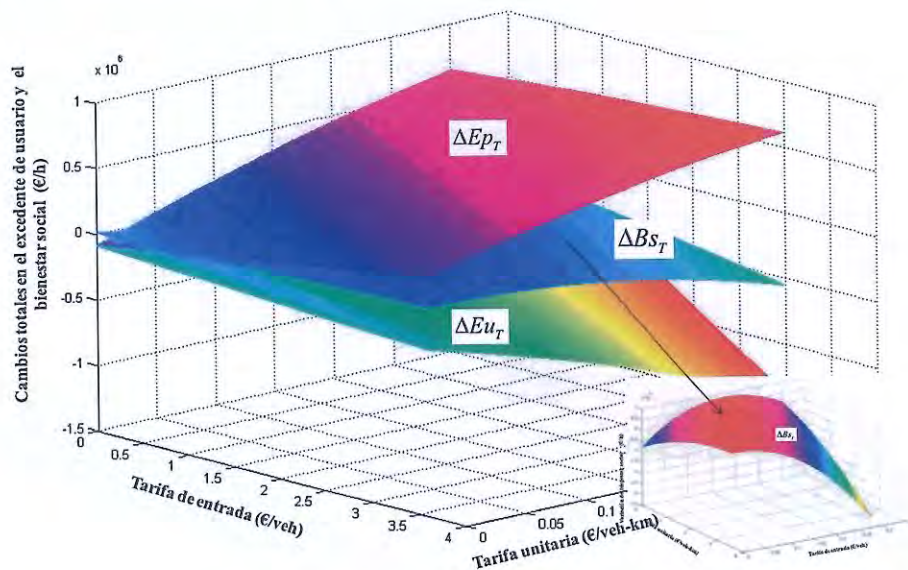


Fig. 6.22. Variación del bienestar social al implantarse una tarifa de acceso + tarifa por kilómetro, definidos los valores de la elasticidad y del precio del tiempo.

Existen infinitas combinaciones posibles para la pareja de tarifas (τ_e, τ_u) que permiten restringir la demanda hasta los niveles deseados, dependiendo de la valoración acertada de la elasticidad y del valor del tiempo, tal como se indica en la figura 6.23. Los planos obtenidos manifiestan que entre menos se valore el tiempo o entre más elástica se suponga la demanda, menor será el nivel de tarifa que permita la obtención de la demanda estipulada, además, tal como lo señala la figura 6.23a la susceptibilidad de la demanda ante el incremento en el valor del tiempo es notable para altas magnitudes de las tarifas. Mientras que en la figura 6.23b las considerables diferencias de los planos

muestra los grandes contrastes al adoptar una demanda más o menos inelástica ante la implantación de esta estructura tarifaria.

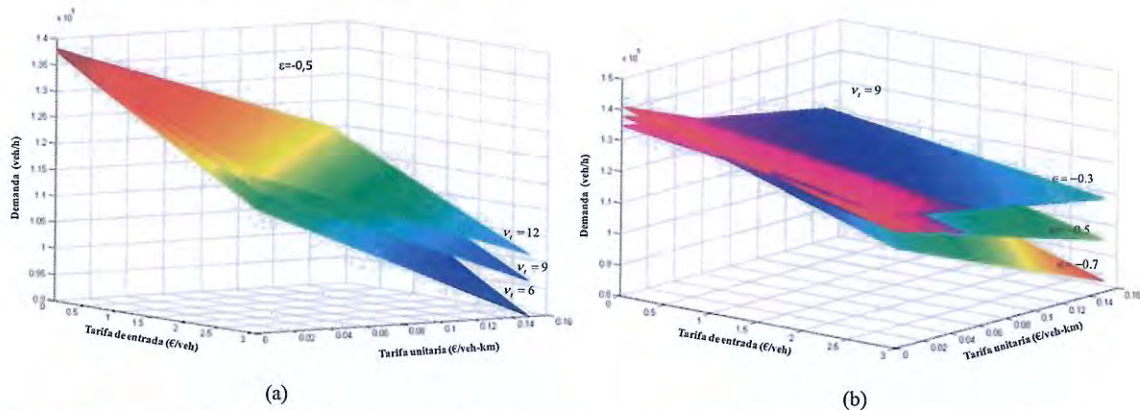


Fig. 6.23. Reducción de la demanda al implantarse una tarifa de acceso + tarifa por kilómetro para varias magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.

La figura 6.24 expone el incremento notable del cambio que se produce en el excedente del productor en función del aumento de las tarifas (τ_e , τ_u). Para una elasticidad de la demanda de -0,5, entre más alto sea la valoración del tiempo mayor será la cantidad de recaudo bruto estimado, tal como se ilustra en la figura 6.24a. Pero en el caso de asumir una demanda muy inelástica y una valoración del tiempo de 9 €/veh-h se produce una sobrevaloración del excedente del productor. También, se evidencia que con la implantación de esta estructura tarifaria en toda la red se obtienen recursos suficientes para asumir los peajes que actualmente se cobran en algunos tramos de autopistas por motivos de financiación.

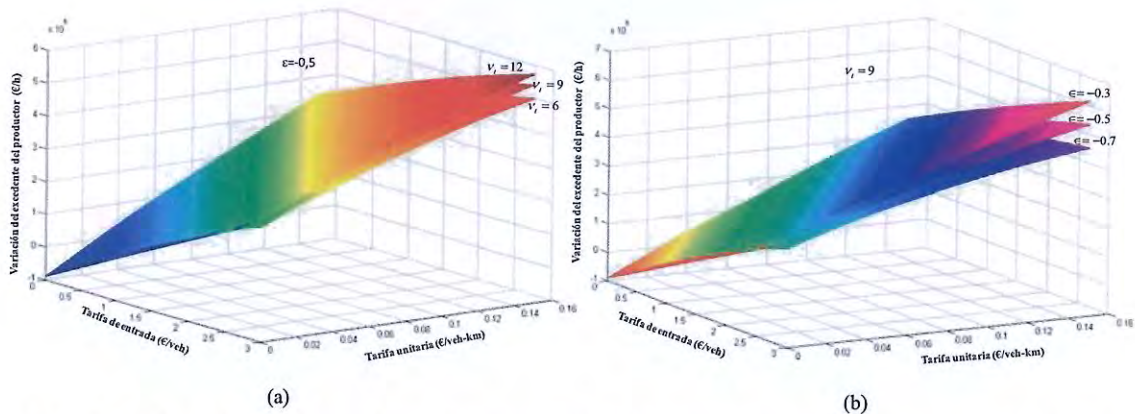


Fig. 6.24. Cambio en el excedente del productor al instaurarse una tarifa de acceso + tarifa por kilómetro para múltiples valores de la elasticidad y valor del tiempo.

En cuanto a la pérdida de excedente de usuario que se produce al reducir la cantidad de tráfico establecida, la figura 6.25 indica la magnitud de dicha pérdida en función de los dos tipos de tarifas. Las curvas reflejan que la pérdida de excedente será mayor si, para una elasticidad resultante se incrementa el valor del tiempo o dado un precio del tiempo determinado se trabaja con una demanda más inelástica.

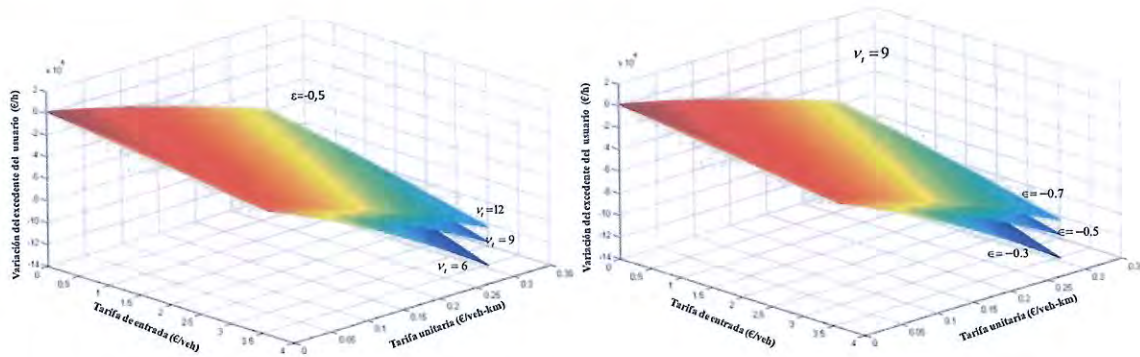


Fig. 6.25. Pérdida de excedente de usuario al instituirse una tarifa de acceso + tarifa por kilómetro al simular diferentes magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.

Los paraboloides de la figura 6.26 representan la variación del bienestar social con respecto al par de tarifas (τ_e, τ_u) y a las diversas valoraciones del tiempo y la elasticidad. El ajuste de cada una de las familias de puntos procedentes de las reducciones de veh-km en los distintos porcentajes se realizó de acuerdo a la ecuación resultante del cambio en el bienestar social, cuya primera derivada indica que los valores máximos son infinitos puntos que forman una recta. La figura 6.26a muestra que la pendiente de la recta que maximiza la variación del bienestar social depende de la cantidad de veh-km que se quiera disuadir y del valor del tiempo, siendo mayor los valores máximos cuanto más se valore el tiempo. Lo anterior se corrobora con la figura 6.27a que señala que para un valoración del tiempo de 12 €/veh-h se obtiene una variación máxima del bienestar social al disminuir la demanda total en un 13,3%, mientras que con una apreciación del tiempo de 6 €/veh-h implica reducir un 11,6% la demanda total de veh-km para alcanzar el máximo de variación de bienestar.

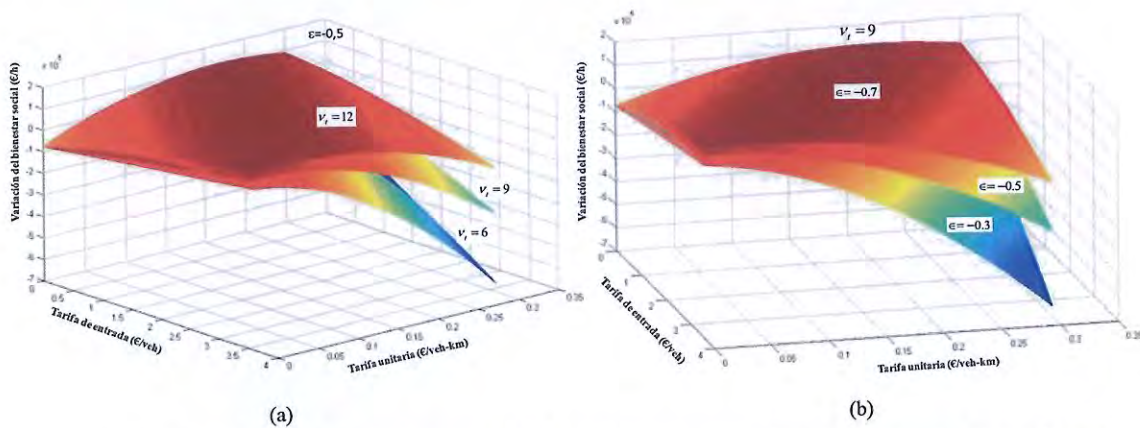
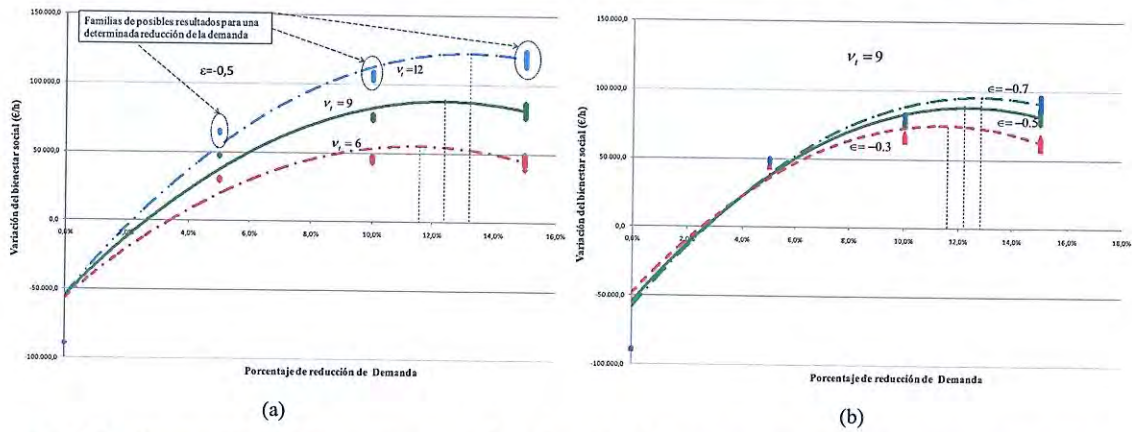


Fig. 6.26. Variación del bienestar social al implantarse una tarifa de entrada + tarifa por kilómetro al trabajar con varias magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.

Por otro lado, las superficies de la figura 6.26b ilustran que la magnitud de la variación del bienestar social es menor cuanto más inelástica sea la demanda. Al igual que en el caso anterior, la curva encontrada es la que más se ajusta a las familias de valores de cambio en el bienestar social obtenidas de las finitas posibilidades prácticas de (τ_e, τ_u) . Si se asume una elasticidad de -0,3 el valor máximo del cambio en el bienestar se

obtiene con un 11,7% de reducción de la demanda, mientras que al suponer una demanda más elástica (-0,7) se requerirá disuadir un 13% de la cantidad de veh-km.



6.4.5 Tarifa combinada: plana + kilométrica lineal

Este esquema combinado de tarificación consta de una tarifa plana que se cobra a los usuarios de las autopistas por entrar o salir de una determinada área de la ciudad, generalmente el CBD, y una tarifa unitaria según el número de kilómetros que recorran fuera de dicha área. El planteamiento para la implantación de esta clase de esquema de road pricing depende de la topología viaria del área metropolitana en estudio. Dado que la topología viaria de este caso particular no es de tipo radial, se evitó trabajar con anillos concéntricos de radio establecido X_c y a cambio se optó por trabajar con las rondas B-10 y B-20, las cuales forman un anillo o cordón alrededor de Barcelona y de L'Hospitalet, cuyo perímetro tiene una longitud de 36,5 km y cubre un área de 73,4 km².

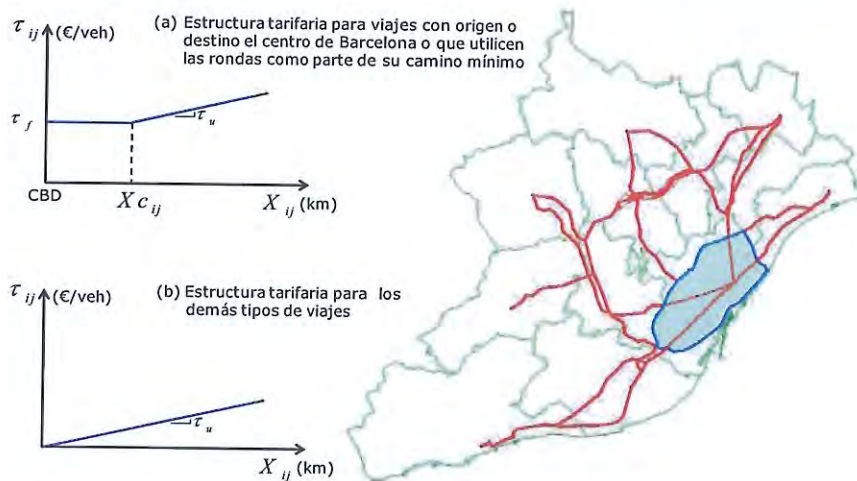


Fig. 6.28. Implantación de una estructura tarifaria combinada sobre la red de autopistas del Área Metropolitana de Barcelona.

Se ha definido como criterio de diseño que todo vehículo que utilice las rondas B-10 y B-20 bien sea en su totalidad o en parte de ellas deberá pagar la tarifa plana τ_f . Para cada par O-D de la red en estudio existe un valor de Xc_{ij} , el cual es estipulado con TransCAD tal como se muestra en la figura 6.28. La longitud de cada Xc_{ij} va desde el centro de gravedad de la zona cubierta por el cordón hasta el punto donde el camino mínimo de cada par O-D involucrado corta las rondas. Lo anterior conduce a la formación de una matriz de distancias Xc_{ij} para todos los viajes que entren o salgan del centro de Barcelona y los viajes que en su recorrido utilicen las rondas. Para los demás viajes se les aplicará una tarifa de tipo kilométrica lineal, como se describió en el epígrafe 6.4.2.

Al igual que en la estructura tarifaria anterior, con la implantación de este tipo de estructura tarifaria, se busca combinar acertadamente las tarifas (τ_f, τ_u) que permitan la reducción de la cantidad de veh-km totales iniciales de la matriz O-D en los porcentajes bajo (5%), medio (10%) y alto (15%). Halladas las familias de tarifas que logran la disuasión de dicha demanda, se procede a evaluar los impactos que se producen sobre cada uno de los indicadores establecidos para luego contrastarlos con los resultados de las magnitudes obtenidas en el escenario base. También, se inspecciona la sensibilidad en la valoración de estos indicadores al variar los parámetros de la elasticidad y del valor del tiempo.

Resultados y análisis de sensibilidad

La aplicación de esta tipología tarifaria permite experimentar los siguientes efectos sobre algunas rutas de mínimo coste entre pares O-D: (i) al emplear una tarifa kilométrica reducida para toda la red y una tarifa plana significativa solamente en el área que cubre el cordón incluido su perímetro, se evitan rápidamente los viajes con trayectos cortos que tenían como origen o destino a Barcelona y en la zona externa al cordón resultan beneficiados los viajes de grandes distancias. (ii) por otro lado, al trabajar con una tarifa plana baja en el área del cordón y una tarifa alta por kilómetro fuera del cordón, resulta restrictivo para todos los viajes que tienen como origen o destino la ciudad de Barcelona. En este caso habría un control puntual sobre los viajes con trayectos cortos, generando una mayor cantidad de recaudo bruto y notables ahorros en los costes sociales de congestión, a cambio de mayores pérdidas en el excedente de usuario.

Los efectos sobre los diversos indicadores se resumen en las tablas 6.9 y 6.10. Existen infinitas combinaciones del par de tarifas (τ_f, τ_u) que dan solución a la gestión de la demanda y de esta forma disuadir el número deseado de veh-km. Los valores prácticos del par de tarifas se han depurado escogiendo los aproximados al c€/veh o c€/veh-km. Las tablas se han estructurado estableciendo una tarifa por kilómetro baja y homogénea acompañada de una tarifa plana que varía según las posibles combinaciones del valor del tiempo y la elasticidad de la demanda con respecto al coste generalizado.

La tabla 6.9 resume los principales impactos en los diversos indicadores definidos al aplicarse este esquema particular. Esta tabla se ha estructurado estableciendo diferentes combinaciones del valor del tiempo y una elasticidad constante de -0,5 con respecto al coste generalizado, para las cuales se han calculado la tarifa por kilómetro óptima para toda la red y la magnitud de la tarifa plana en la zona del cordón. La susceptibilidad en la cuantificación de los indicadores evaluados frente a los valores de las tarifas que disuaden el porcentaje de tráfico deseado señala la importancia de seleccionar acertadamente tanto la elasticidad como el valor del tiempo.

Tabla 6.9. Resultados y análisis de sensibilidad respecto al valor del tiempo al implantarse una estructura tarifaria compuesta por un tarifa plana + tarifa por kilómetro.

| INDICADOR A EVALUAR | TARIFA PLANA + KILOMÉTRICA LINEAL | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | 6,0 | | | 9,0 | | | 12,0 | | |
| Demanda inicial, Q^0 (*10 ⁵ veh-km/h) | 31,28 | | | | | | | | |
| Recaudo inicial, I^0 (*10 ⁵ €/h) | 0,89 | | | | | | | | |
| Elasticidad, ϵ | -0,50 | | | | | | | | |
| Valor del tiempo, v_t (€/veh-h) | 6,0 | | | 9,0 | | | 12,0 | | |
| Porcentaje de disminución de demanda deseado, (%) | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% |
| Tarifa plana en el cordón, τ_f (€/veh) | 0,75 | 1,10 | 1,89 | 0,98 | 1,55 | 2,52 | 1,21 | 1,98 | 3,14 |
| Tarifa kilométrica, τ_u (€/veh-km) | 0,05 | 0,09 | 0,10 | 0,05 | 0,09 | 0,10 | 0,05 | 0,09 | 0,10 |
| Demanda final, Q^1 (*10 ⁵ veh-km/h) | 29,72 | 28,16 | 26,60 | 29,72 | 28,14 | 26,60 | 29,72 | 28,15 | 26,59 |
| Variación de la demanda (%) | 5,00% | 9,99% | 15,01% | 5,00% | 10,02% | 14,99% | 4,99% | 10,01% | 15,01% |
| Recaudo final, I^1 (*10 ⁵ €/h) | 2,16 | 3,39 | 4,31 | 2,44 | 3,92 | 5,02 | 2,73 | 4,42 | 5,71 |
| Variación del recaudo, ΔI_t (*10 ⁵ €/h) | 1,27 | 2,50 | 3,42 | 1,55 | 3,03 | 4,13 | 1,84 | 3,53 | 4,82 |
| Tarifa promedio en toda la red, τ_p (€/veh) | 1,74 | 2,89 | 3,90 | 1,97 | 3,35 | 4,53 | 2,21 | 3,78 | 5,16 |
| Tarifa unitaria media en toda la red, τ_u (€/veh-km) | 0,08 | 0,14 | 0,20 | 0,09 | 0,17 | 0,24 | 0,10 | 0,19 | 0,28 |
| Variación del Excedente de usuario, ∇Eu (*10 ⁵ €/h) | 1,01 | 2,13 | 3,07 | 1,13 | 2,37 | 3,41 | 1,24 | 2,58 | 3,73 |
| Variación total del Bienestar Social, ΔBs_t (*10 ⁵ €/h) | 0,26 | 0,37 | 0,36 | 0,42 | 0,66 | 0,72 | 0,59 | 0,95 | 1,09 |
| Relación $\Delta Bs_t/\nabla Eu$ (%) | 25,8% | 17,2% | 11,6% | 37,1% | 27,7% | 21,1% | 47,6% | 36,9% | 29,1% |

Los resultados muestran que cuanto más se valore el tiempo mayor será la tarifa plana dentro del cordón para reducir la misma cantidad de demanda, lo que implica que para toda la red, las magnitudes de las tarifas promedio y unitaria, el recaudo final, el excedente de usuario inicial total y la variación de bienestar social sean superiores. También, se determina que para un mismo valor del tiempo una mayor disminución de veh-km requerirá que el par de tarifas (τ_f, τ_u) sean superiores y causará indiscutiblemente mayores impactos sobre los indicadores evaluados, siendo la maximización del cambio en el bienestar social el que permita obtener ese porcentaje óptimo de reducción. Como ejemplo, adoptemos que el valor actual del tiempo es 9 €/veh-h y se requiere reducir la demanda en 10%. Si se supone un valor del tiempo de 12 €/veh-h implica incrementar la tarifa plana dentro del cordón en 28% para la misma tarifa unitaria, lo cual genera una sobrevaloración del cambio de bienestar social en 44%, mientras que si se adopta un valor de 6 €/veh-h se requiere ajustar dicha tarifa plana en -41%. También, al revisar el ratio entre el cambio en el bienestar social total y la pérdida de excedente de usuario se encuentra que su valor se acrecienta al valorar demasiado el tiempo para una misma disminución de la demanda. Sin embargo, dicha relación disminuye cuanto más se disuada el número de veh-km.

Tabla 6.10. Resultados y análisis de sensibilidad respecto a la elasticidad de la demanda al implantarse una estructura tarifaria compuesta por un tarifa plana + tarifa por kilómetro.

| INDICADOR A EVALUAR | TARIFA PLANA + KILOMÉTRICA LINEAL | | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|
| | Demanda inicial, Q^0 (* 10^5 veh-km/h) | 31,28 | | | | | | | |
| Recaudo inicial, I^0 (* 10^5 €/h) | 0,89 | | | | | | | | |
| Valor del tiempo, v_t (€/veh-h) | 9,0 | | | | | | | | |
| Elasticidad, ϵ | -0,3 | | | -0,5 | | | -0,7 | | |
| Porcentaje de disminución de demanda deseado, (%) | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% |
| Tarifa plana en el cordón, τ_f (€/veh) | 1,61 | 2,65 | 4,09 | 0,98 | 1,55 | 2,52 | 0,71 | 1,00 | 1,71 |
| Tarifa kilométrica, τ_u (€/veh-km) | 0,05 | 0,10 | 0,12 | 0,05 | 0,09 | 0,10 | 0,05 | 0,09 | 0,10 |
| Demanda final, Q^1 (* 10^5 veh-km/h) | 29,72 | 28,15 | 26,59 | 29,72 | 28,14 | 26,60 | 29,72 | 28,16 | 26,59 |
| Variación de la demanda (%) | 4,99% | 10,02% | 15,00% | 4,99% | 10,04% | 14,99% | 5,00% | 9,99% | 15,00% |
| Recaudo final, I^1 (* 10^5 €/h) | 3,22 | 5,44 | 7,20 | 2,44 | 3,92 | 5,02 | 2,11 | 3,27 | 4,11 |
| Variación del recaudo, ΔI_t (* 10^5 €/h) | 2,33 | 4,55 | 6,31 | 1,55 | 3,03 | 4,13 | 1,22 | 2,38 | 3,22 |
| Tarifa promedio en toda la red, τ_p (€/veh) | 2,61 | 4,65 | 6,51 | 1,97 | 3,35 | 4,53 | 1,70 | 2,79 | 3,72 |
| Tarifa unitaria media en toda la red, τ_u (€/veh-km) | 0,13 | 0,23 | 0,35 | 0,09 | 0,17 | 0,24 | 0,08 | 0,14 | 0,19 |
| Variación del Excedente de usuario, ∇Eu (* 10^5 €/h) | 1,88 | 3,88 | 5,66 | 1,07 | 2,26 | 3,28 | 0,73 | 1,58 | 2,29 |
| Variación total del Bienestar Social, ΔBs_t (* 10^5 €/h) | 0,45 | 0,68 | 0,65 | 0,48 | 0,76 | 0,85 | 0,49 | 0,80 | 0,93 |
| Relación $\Delta Bs_t/\nabla Eu$ (%) | 24,2% | 17,5% | 11,5% | 44,6% | 33,7% | 25,8% | 67,8% | 50,9% | 40,4% |

La tabla 6.10 muestra la simulación de diversas magnitudes de elasticidad para una valoración del tiempo de 9 €/veh-h determina que las tarifas plana y kilométrica que reducen una misma cantidad de demanda son mayores cuanto más inelástica sea la demanda y por ende, la tarifa promedio, tarifa unitaria media, el recaudo final y la variación del excedente de usuario son superiores. Por ejemplo, para un 10% de reducción de la demanda y al seleccionar una elasticidad actual de -0,5, se requerirá ampliar la tarifa plana dentro del cordón en un 71% y la tarifa por kilómetro en 11% si se asume una elasticidad de -0,3, mientras que si se adopta un valor de -0,7 implicará ajustar solo la tarifa plana en -55%.

En cuanto a la variación de bienestar social se destaca que su valoración permanece prácticamente igual cuando se ocasionan reducciones bajas de la demanda, pero cuando la disuasión de veh-km es media o alta, dicha variación es menor cuanto más inelástica sea la demanda con respecto a las tarifas. Con 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; pero decrece cuando se desea reducir mayor número de veh-km.

Se resalta en este análisis de sensibilidad de las tablas anteriores, que al asumir un error en la valoración de la elasticidad o del valor tiempo, la cuantificación de las tarifas dentro del cordón y por kilómetro recorrido no serán fiables y por lo tanto, la estimación de la magnitud de los diversos indicadores que dependen de estas tarifas sería errónea.

Análisis de resultados

En el análisis de este esquema tarifario combinado se producen infinitas combinaciones de tarifas (τ_f , τ_u) que logran cumplir con la disuasión de la demanda en la cantidad de

veh-km deseada (5%, 10% y 15%) generando a la vez fiabilidad en la duración del tiempo de viaje en el escenario futuro. Es necesario clarificar, que para obtener estas reducciones de tráfico en toda la red se han dividido los viajes de los diferentes pares O-D entre: (i) los viajes o vehículos que usan las rondas o salen o entran a la ciudad de Barcelona, este grupo de vehículos deberá asumir además de una tarifa unitaria por kilómetro una tarifa plana por entrar o salir de la zona y (ii) los vehículos que no requieren usar las rondas deberán pagar solamente una tarifa unitaria kilométrica igual a los del primer grupo.

Junto con el estudio del par de tarifas, se analizan los efectos sobre un determinado indicador (z) al reducir en un cierto porcentaje la cantidad de veh-km con lo cual se obtienen familias de puntos en 3D (τ_f, τ_u, z) . Dado que se han establecido tres niveles de disminución de la demanda y se conocen las magnitudes del indicador en el escenario base, se realiza un análisis de regresión lineal en el caso de la demanda y no lineal cuando se evalúan los cambios de los excedentes de usuario y productor y del bienestar social. Al igual que en la estructura tarifaria anterior, para realizar estos análisis de regresión se empleó el programa SPSS. Para ello se definen las variables dependientes e independientes y se introducen todos los valores (τ_f, τ_u, z) para cada indicador junto con la ecuación que los ha producido y sus correspondientes parámetros iniciales de la función original que las produjo, con los cuales se le indica al programa que encuentre los parámetros generales de la correlación después de la convergencia. Encontrados los parámetros generales que definen la superficie de comportamiento para cada indicador con respecto al par de tarifas por kilómetro plana en la zona cubierta por las rondas B-10 y B-20, se procede a graficarlas empleando MATLAB.

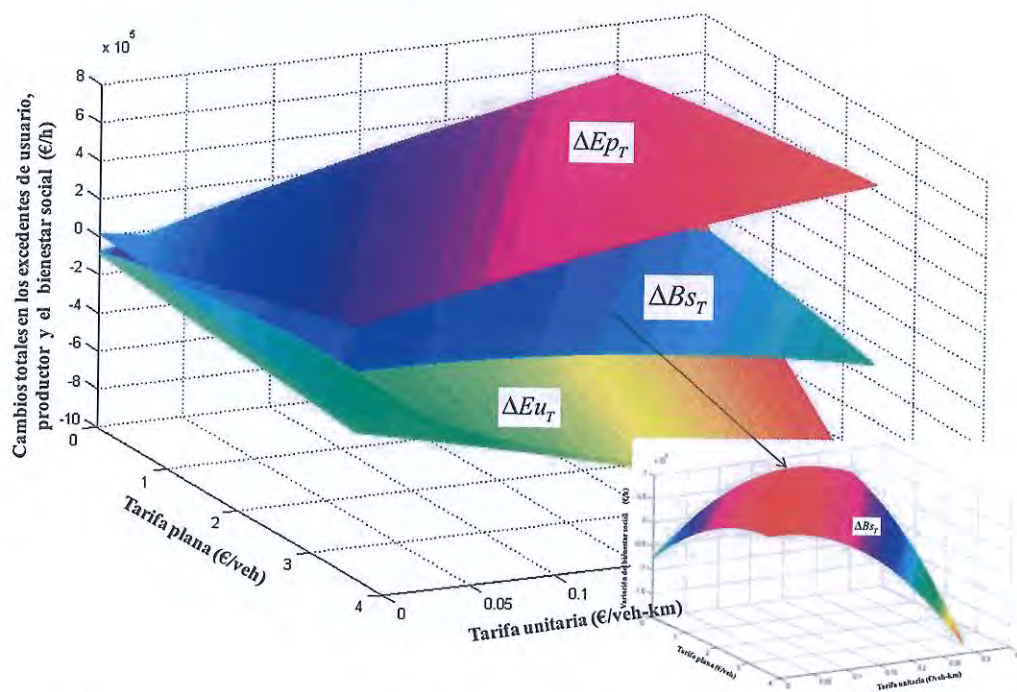


Fig. 6.29. Variación del bienestar social al implantarse una tarifa plana + tarifa kilométrica, definidos los valores de la elasticidad y del precio del tiempo.

Originariamente se graficaron las superficies de la pérdida del excedente de usuario, la variación excedente del productor y el cambio en el bienestar social considerando una elasticidad de $-0,5$ y el precio del tiempo de 9 €/veh-h . Estas superficies que se muestran en la figura 6.29 representan el comportamiento de estos indicadores ante las infinitas combinaciones del par de tarifas (τ_f, τ_u) . Además, se aprecia que cuando 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 se obtienen por motivos de la financiación de algunos tramos de autopistas) y a medida que se van incrementando se refleja la ganancia esperada en el excedente del productor así como la pérdida creciente en el excedente de usuario lo cual conduce a que la superficie de la variación del bienestar social señale valores máximos para múltiples combinaciones del par de tarifas.

En la figura 6.30 se ilustran las infinitas combinaciones posibles del par de tarifas (τ_f, τ_u) que permiten restringir la demanda hasta el nivel deseado, dependiendo de la valoración acertada de la elasticidad y el valor del tiempo. Las superficies obtenidas manifiestan que entre menos se valore el tiempo o entre más elástica se suponga la demanda, menor será el nivel de tarifa que permita la obtención del tráfico estipulado, además, tal como lo indica la figura 6.30a la susceptibilidad de la demanda ante el incremento en el valor del tiempo es importante para altas magnitudes de las tarifas. Mientras que en la figura 6.23b las considerables diferencias de los planos muestra los grandes contrastes al optar por una demanda más o menos inelástica ante la implantación de esta topología tarifaria.

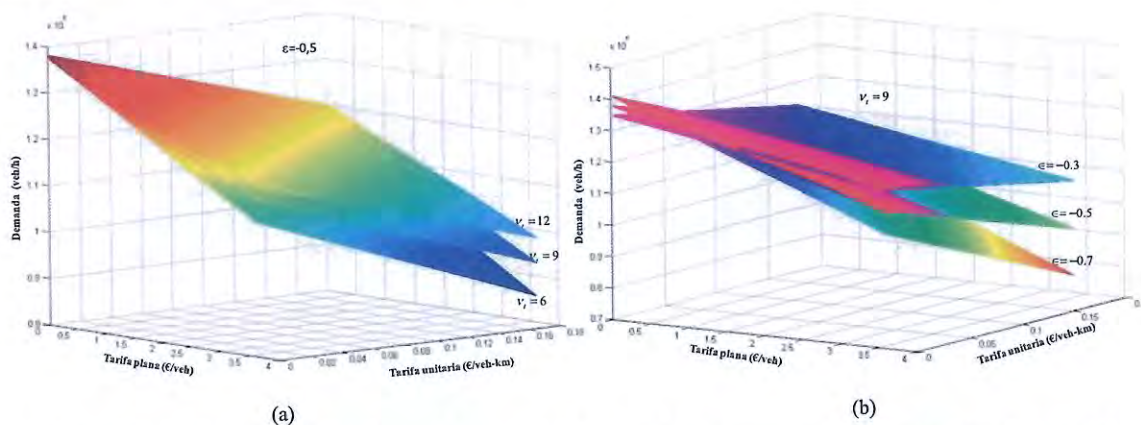


Fig. 6.30. Reducción de la demanda en toda la red al implantarse una tarifa plana + tarifa kilométrica al simular diferentes magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.

La figura 6.31 explica el notable incremento del cambio que se produce en el excedente del productor en función del aumento de las tarifas (τ_f, τ_u) . Para una elasticidad de la demanda de $-0,5$, entre más alto sea la valoración del tiempo mayor será la cantidad de recaudo bruto estimado, tal como se ilustra en la figura 6.31a. Pero en el caso de asumir una demanda más inelástica y una valoración del tiempo de 9 €/veh-h se produce una sobrevaloración de dicho excedente. También, se evidencia que con la implantación en toda la red de esta estructura tarifaria se obtienen recursos suficientes para cubrir los ingresos iniciales que actualmente se cobran en algunos tramos de autopistas por

motivos de financiación. Este recaudo inicial se evidencia en la figura 6.31 al representarse como valor negativo en ausencia de la tarifa por congestión.

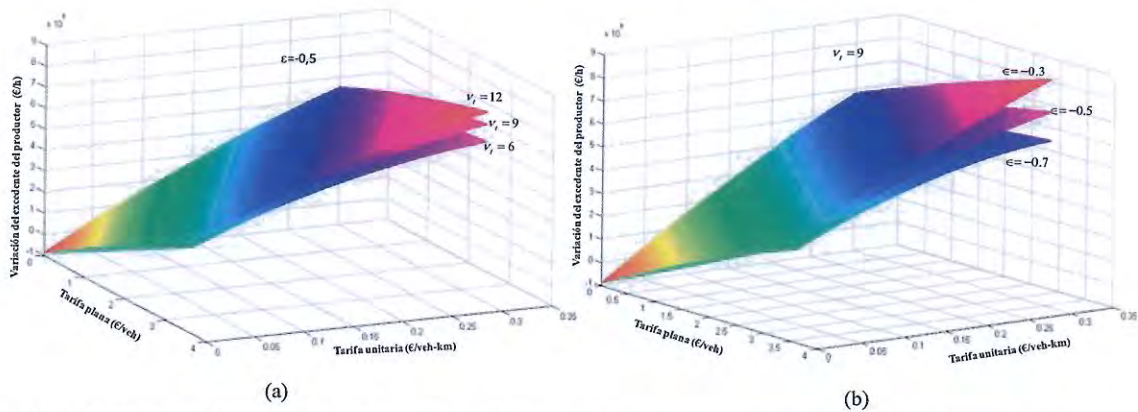


Fig. 6.31. Cambio total en el excedente del productor al instaurarse una tarifa plana + tarifa kilométrica para diferentes magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.

En cuanto a la pérdida de excedente de usuario que se produce al reducir la cantidad de tráfico establecida, la figura 6.32 señala la magnitud de esta pérdida en función de los dos tipos de tarifas. Las curvas reflejan que la pérdida de excedente será mayor si, dado un precio del tiempo determinado se trabaja con una demanda más inelástica o se incrementa el valor del tiempo para una elasticidad dada. Su valor inicial de cero indica que no hay pérdida con respecto al escenario base cuando no se cobra la tarifa por congestión.

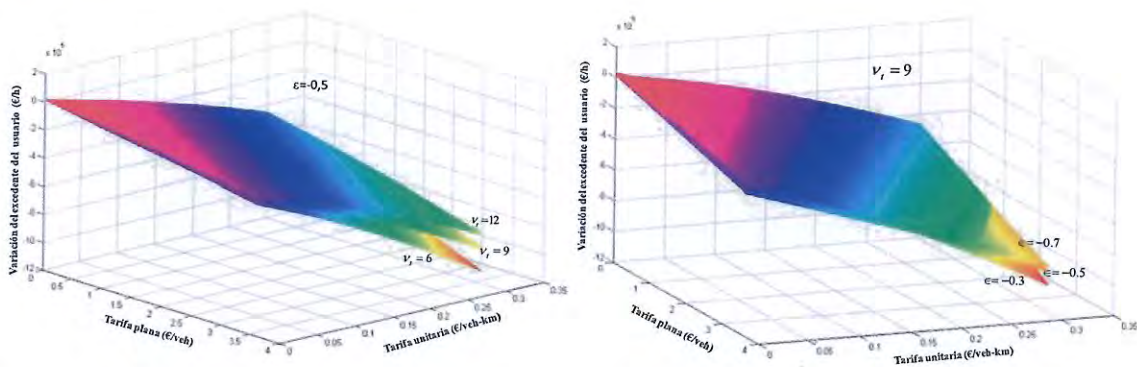


Fig. 6.32. Pérdida total de excedente de usuario al instituirse una tarifa plana + kilométrica y simular diferentes magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.

La figura 6.33 muestra los paraboloides del cambio en el bienestar social respecto a los niveles de tarifas (τ_f , τ_u) y a las diversas valoraciones del tiempo y de la elasticidad. Al igual que en las demás topologías tarifarias, las superficies parten de una magnitud negativa que equivale a los ingresos que inicialmente se perciben por concepto de financiación de algunas infraestructuras. El modelo contempla que dichos ingresos deben superarse al implantarse este esquema de *road pricing* para no alterar el equilibrio económico financiero de la concesión. Se observa que a medida que se incrementa el valor de las tarifas plana y kilométrica, las superficies se van incrementando de forma positiva hasta llegar a una serie de valores máximos, tal como

lo indica la primera derivada de esta ecuación. Después de alcanzados estos máximos de eficiencia, las magnitudes del cambio de bienestar empiezan a decrecer así como se corrobora en la figura 6.34.

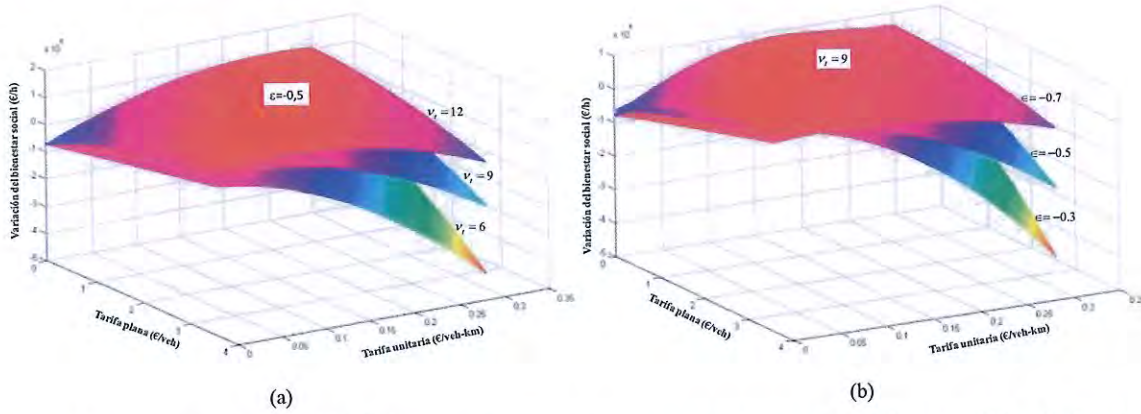


Fig. 6.33. Variación total del bienestar social al implantarse una tarifa plana + kilométrica y trabajar con múltiples magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.

Para cada porcentaje de disuasión de la demanda, el ajuste de cada una de las familias de puntos se realizó de acuerdo a la ecuación resultante del cambio en el bienestar social, cuya primera derivada revela que los valores máximos son infinitos puntos que forman una recta. Asignando una elasticidad de -0,5 se obtienen los paraboloides de la figura 6.33a que detallan el incremento en la magnitud del cambio en el bienestar social ante una valoración creciente del tiempo, encontrándose a través de la figura 6.34a que para un precio del tiempo de 12 €/veh-h se logra una variación máxima del bienestar social al disminuir la demanda total en un 13,5%, mientras que con una apreciación del tiempo de 6 €/veh-h implica reducir un 11,6% la demanda total de veh-km para alcanzar el máximo de variación de bienestar, obviamente de menor magnitud.

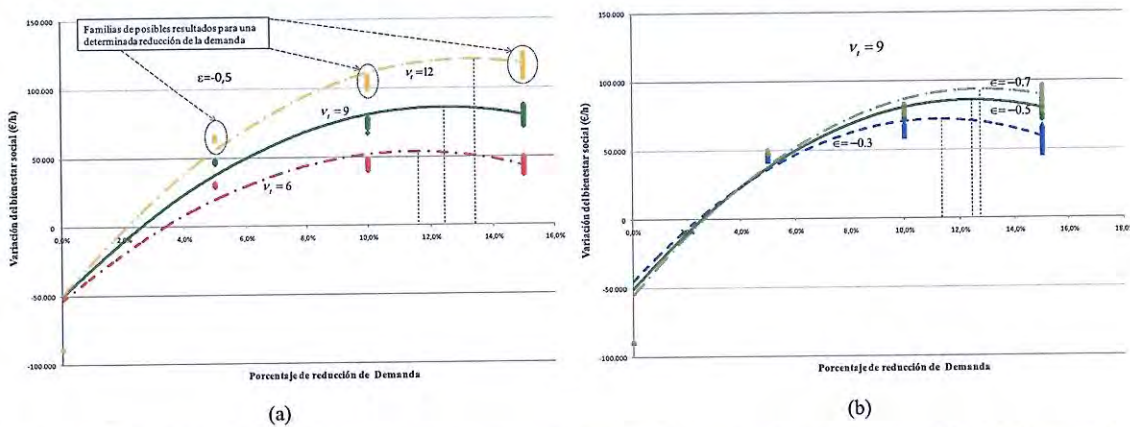


Fig. 6.34. Variación del bienestar social en función del porcentaje de reducción de demanda para diferentes magnitudes de elasticidad y valor del tiempo.

Las superficies de la figura 6.33b y las curvas de la figura 6.34b ilustran que la magnitud de la variación del bienestar social es menor cuanto más inelástica sea la demanda. Al igual que en el caso anterior, la curva que más se ajusta a las familias de valores de cambio en el bienestar social es hallada con las finitas posibilidades prácticas

de (τ_f, τ_u) . Al trabajar con una elasticidad de $-0,3$ el valor máximo del cambio en el bienestar se alcanza con un $11,7\%$ de reducción de la demanda, mientras que suponiendo una demanda más elástica ($-0,7$) se requerirá disuadir un $12,8\%$ la cantidad total de veh-km.

6.5 Evaluación y selección del esquema de *road pricing*

Con base en los resultados anteriores, a continuación se analiza en conjunto los efectos que producen los diversos esquemas tarifarios sobre cada uno de los indicadores evaluados. Posteriormente, a través de un análisis multicriterio basado en un proceso analítico de jerarquización se selecciona el esquema tarifario a implantar.

6.5.1 Contrastación y análisis general de resultados

Para realizar la contrastación entre las estructuras tarifarias se escogió una elasticidad de la demanda respecto al coste generalizado de $-0,5$ y un valor del tiempo de 9 €/veh-h , los cuales corresponden a los valores intermedios del análisis de sensibilidad anterior y son coherentes a la situación actual del Área Metropolitana de Barcelona.

La tabla 6.11 resume las magnitudes de los efectos sobre cada uno de los indicadores valorados empleando los cinco esquemas de *road pricing* estudiados. En esta tabla se presentan el valor de las tarifas a cobrar para gestionar la demanda y poder reducir la cantidad de veh-km iniciales de toda la red en los porcentajes bajo (5%), medio (10%) y alto (15%).

Para la comparación del nivel de tarifas se han empleado los indicadores tarifa promedio y tarifa unitaria media en toda la red, cuyo comportamiento frente a las reducciones del tráfico y topología tarifaria han sido graficadas en la figura 6.35.

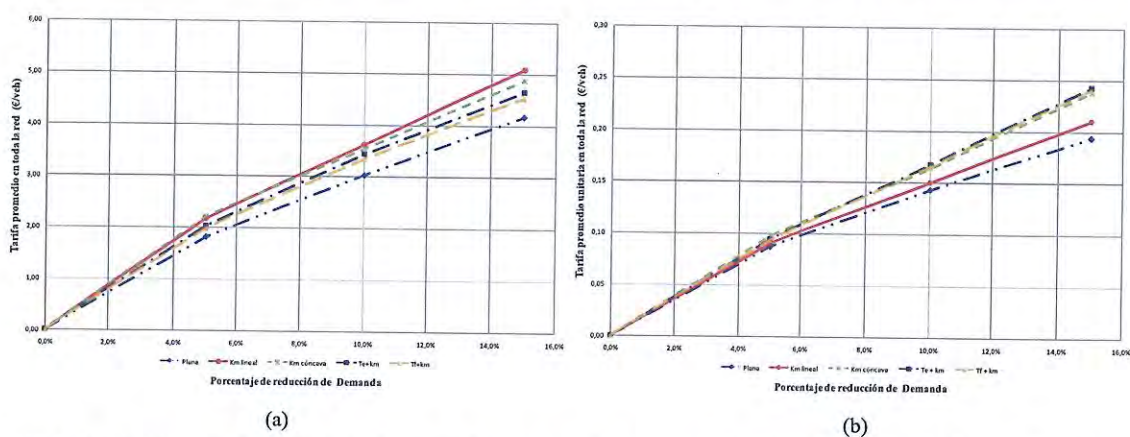


Fig. 6.35. Nivel de tarifas a cobrar en función del porcentaje de reducción de demanda y los diversos esquemas de *road pricing* analizados.

Tabla 6.11. Contraste de los diferentes esquemas de road pricing para cada una de las reducciones de demanda establecidas a través de diversos indicadores socioeconómicos.

| Indicadores a evaluar | Estructura tarifaria | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------|--------|-----------|-------|--------|------------|-------|--------|--------------------|--------|--------|--------------------|--------|--------|
| | Plana | | | Km lineal | | | Km cóncava | | | Acceso + km lineal | | | Cordón + km lineal | | |
| Demanda inicial, Q_0 (*10 ⁵ veh-km/h) | 31,28 | | | | | | | | | | | | | | |
| Recaudo inicial, I^0 (*10 ⁵ €/h) | 0,89 | | | | | | | | | | | | | | |
| Valor del tiempo, v_t (€/veh-h) | 9,0 | | | | | | | | | | | | | | |
| Elasticidad, ε | -0,50 | | | | | | | | | | | | | | |
| Porcentaje de disminución de demanda deseado, (%) | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% | 5% | 10% | 15% |
| Tarifa plana, τ_f o de entrada τ_c (€/veh) | 1,81 | 3,03 | 4,17 | - | - | - | 0,81 | 1,24 | 2,18 | 0,81 | 1,24 | 2,18 | 0,98 | 1,55 | 2,52 |
| Tarifa kilométrica, τ_u (€/veh-km) | 29,71 | - | - | 0,09 | 0,15 | 0,21 | 0,09 | 0,15 | 0,21 | 0,15 | 0,21 | 0,21 | 0,05 | 0,09 | 0,10 |
| Demanda final, Q^1 (*10 ⁵ veh-km/h) | 29,71 | 28,15 | 26,59 | 29,74 | 28,23 | 26,58 | 29,59 | 28,16 | 26,60 | 29,72 | 28,15 | 26,59 | 29,72 | 28,14 | 26,60 |
| Variación de la demanda (%) | 5,03% | 10,02% | 15,00% | 4,92% | 9,78% | 15,04% | 4,92% | 9,78% | 15,04% | 5,00% | 10,02% | 14,99% | 4,99% | 10,04% | 14,99% |
| Recaudo final, I^1 (*10 ⁵ €/h) | 2,24 | 3,55 | 4,61 | 2,68 | 4,25 | 5,62 | 2,72 | 4,15 | 5,40 | 2,50 | 4,02 | 5,14 | 2,44 | 3,92 | 5,02 |
| Variación del recaudo, ΔI_t (*10 ⁵ €/h) | 1,35 | 2,66 | 3,72 | 1,79 | 3,36 | 4,73 | 1,83 | 3,26 | 4,51 | 1,61 | 3,13 | 4,25 | 1,55 | 3,03 | 4,13 |
| Tarifa promedio en toda la red, τ_p (€/veh) | 1,81 | 3,03 | 4,17 | 2,17 | 3,62 | 5,08 | 2,21 | 3,54 | 4,88 | 2,02 | 3,44 | 4,65 | 1,97 | 3,35 | 4,53 |
| Tarifa unitaria media en toda la red, τ_u (€/veh-km) | 0,09 | 0,14 | 0,19 | 0,09 | 0,15 | 0,21 | 0,10 | 0,16 | 0,24 | 0,09 | 0,17 | 0,24 | 0,09 | 0,17 | 0,24 |
| Variación del Excedente de usuario, ∇Eu (*10 ⁵ €/h) | 0,86 | 1,87 | 2,85 | 1,33 | 2,62 | 3,97 | 1,37 | 2,51 | 3,72 | 1,13 | 2,37 | 3,41 | 1,07 | 2,26 | 3,28 |
| Variación total del Bienestar Social, ΔBS_t (*10 ⁵ €/h) | 0,48 | 0,78 | 0,87 | 0,47 | 0,74 | 0,76 | 0,46 | 0,74 | 0,79 | 0,48 | 0,76 | 0,84 | 0,48 | 0,76 | 0,85 |
| Relación $\Delta BS_t/\nabla Eu$ (%) | 56,1% | 41,8% | 30,4% | 35,2% | 28,2% | 19,2% | 33,4% | 29,4% | 21,1% | 42,3% | 32,2% | 24,8% | 44,6% | 33,7% | 25,8% |

Los valores más altos de la tarifa media que pagaría cada vehículo se obtendrán si se implanta una estructura kilométrica lineal, seguida por la estructura kilométrica cóncava (debido a que el objetivo es disuadir el tráfico, esta topología requiere una tarifa unitaria mayor respecto a la que solamente es lineal). Además, la figura 6.35 b ilustra que las mayores tarifas unitarias medias se obtienen con la estructura kilométrica cóncava y los dos sistemas complejos de tarifación. Los valores más bajos de los dos tipos de tarifas se adquieren con la estructura plana.

Teniendo en cuenta que actualmente hay una captación de ingresos por motivos de financiación de algunos tramos de autopistas, se analiza la variación del recaudo bruto futuro que se obtendría al implantar cualquiera de los esquemas tarifarios en estudio. Tanto los valores de la tabla 6.11 como la figura 6.36 señalan a las estructuras kilométricas lineal y cóncava como las ideales para obtener los mayores recaudos brutos. El tramo negativo de las curvas indica que si las tarifas para gestionar la demanda son bajas, los ingresos que se captan no son suficientes para cubrir el recaudo actual que obtienen las concesionarias. Esta figura también ilustra que los menores recaudos se perciben al implantar una tarifa plana en toda la red.

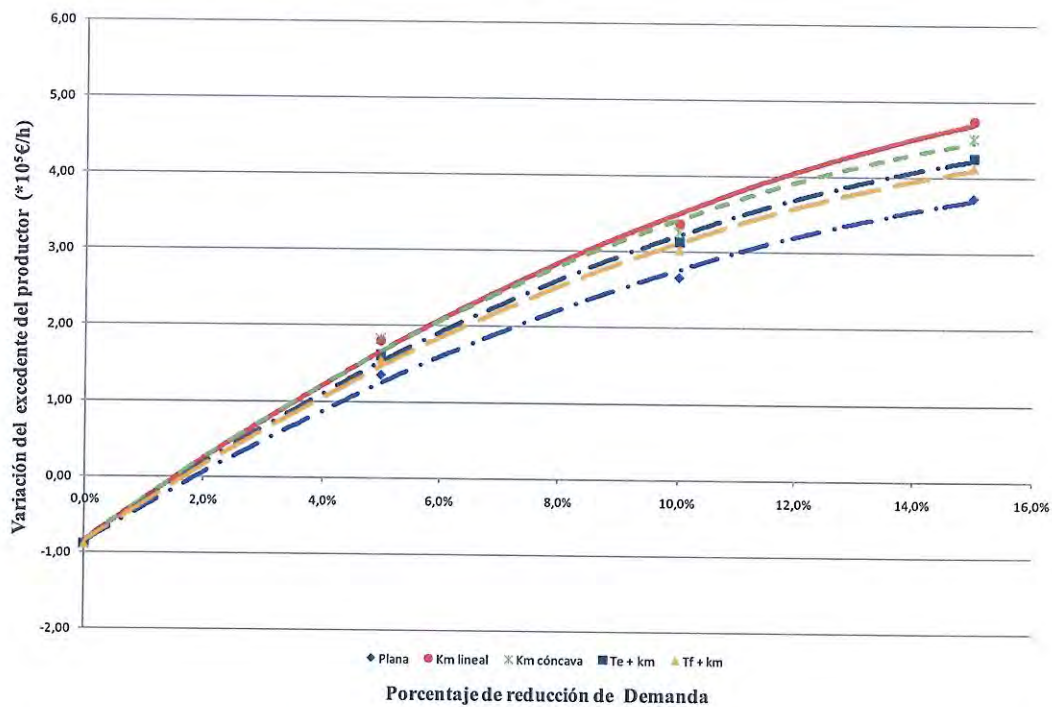


Fig. 6.36. Comportamiento del recaudo futuro bruto frente al porcentaje de reducción de demanda y las diferentes estructuras tarifarias a implantar.

En cuanto a la pérdida de excedente de usuario que se presenta en los usuarios de la vía al implantar cualquier medida de tipo tarifario, la figura 6.37 ilustra que con las estructuras kilométricas lineal y cóncava se obtienen las mayores pérdidas de este excedente, seguidas por los esquemas combinados. La menor variación del excedente de usuario se consigue aplicando una tarifa plana en toda la red. Nótese que en ausencia de tarifas no hay cambio en el excedente de usuario inicial.

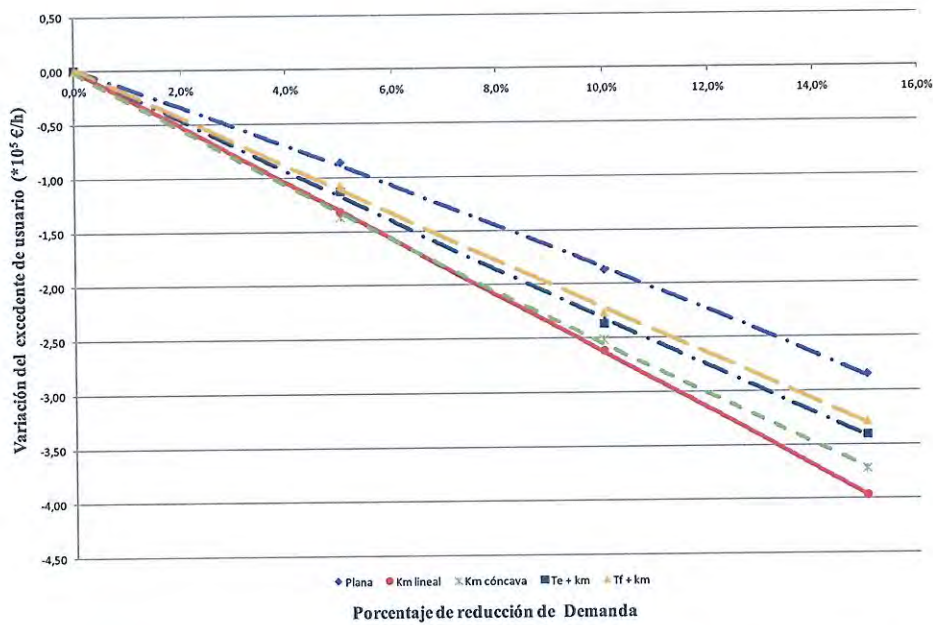


Fig. 6.37. Pérdidas en el excedente del usuario de la carretera al reducir la cantidad de veh-km demandados al implantarse diferentes estructuras tarifarias.

La ganancia de eficiencia que se produce al reducir una cantidad excesiva de viajes o veh-km (los que producen costes externos) realizados en coche a través de la implantación de un esquema de *road pricing*, se representa a través del concepto de cambio en el bienestar social. Este cambio de bienestar se encuentra sumando la variación de los excedentes de usuario y productor, tal como lo señala el fundamento unimodal de la economía del transporte.

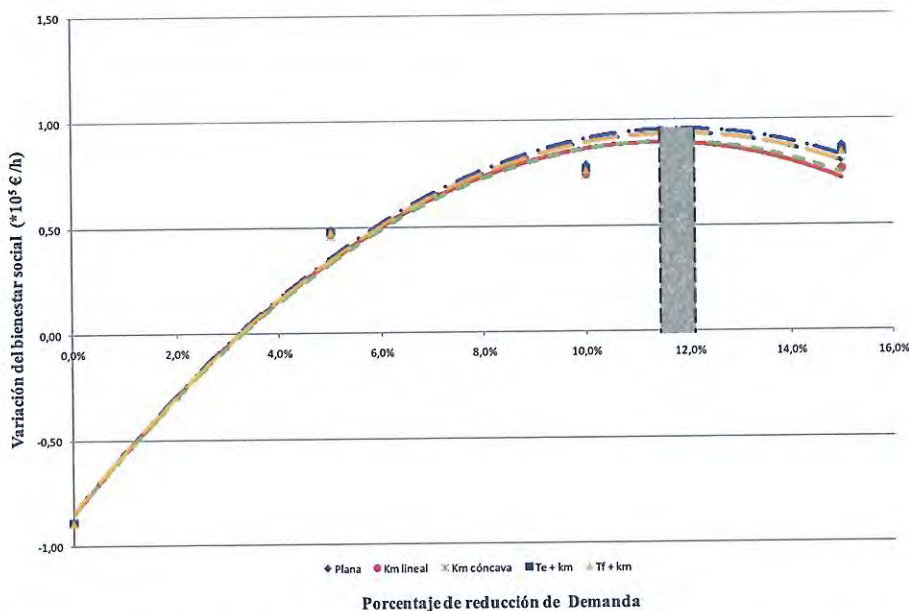


Fig. 6.38. Variación del bienestar social al reducir la cantidad de veh-km demandados en coche al implantarse diferentes estructuras tarifarias.

La figura 6.38 muestra que a medida que se disuade un número excesivo de demanda se va obteniendo una ganancia de bienestar social hasta llegar a un valor máximo, punto en el cual dicha eficiencia óptima empieza a perderse por una desproporcionada reducción de la demanda (traducida en desaprovechamiento de la capacidad viaria). La magnitud de este valor máximo es distinto dependiendo 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 de la topología tarifaria que se aplique.

Los resultados encontrados señalan que la diferencia de magnitudes de los valores máximos de la variación de bienestar al aplicar cualquiera de los esquemas tarifarios analizados oscila en un rango entre 0,89 y $0,95 \cdot 10^5$ €/h, donde el límite inferior corresponde a una estructura kilométrica lineal y el límite superior lo establece la tarifa plana. Para alcanzar estos máximos, se requiere reducir el tráfico entre un 11,4 y 11,8%, como lo ilustra la figura 6.38.

De acuerdo con los resultados de la tabla 6.11, 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 obtener, lo cual es un punto importante en el momento de elección del esquema tarifario dado que se requiere reciclar ingresos bien sea para invertirlo en infraestructura o en el mejoramiento del transporte público.

6.5.2 Selección del esquema tarifario a implantar

Contrastados y analizados los efectos que producen cada uno de los esquemas de *road pricing* sobre los diversos indicadores operacionales y socioeconómicos seleccionados, se encuentra que para una elasticidad y valoración del tiempo determinada:

- La implantación de cualquiera de las estructuras tarifarias analizadas permite gestionar el número de viajes o veh-km a los niveles deseados;
- La disuasión de la demanda permite incrementar las velocidades de operación, mejorar la fiabilidad del tiempo de viaje, reducir congestión y efectos medioambientales;
- Los mayores recaudos se consiguen a costa de mayores pérdidas de excedente de usuario y viceversa;
- El recaudo bruto esperado supera fácilmente los ingresos iniciales que actualmente se obtienen por motivos de financiación de algunos tramos de autopistas de la red;
- Las ganancias máximas de variación de bienestar son semejantes en magnitud, al igual que las reducciones de tráfico que permiten dichos máximos.

Con base en estos hechos resulta dificultoso poder seleccionar de manera inmediata la estructura tarifaria idónea, pues todas las topologías tarifarias cumplen con los objetivos buscados en mayor o menor medida. Dada esta dificultad se recurre a la teoría de análisis de decisión a través de un proceso analítico de jerarquización (detallado en el capítulo 4) para evitar problemas de subvaloración en los indicadores estudiados y también para reincorporar otros criterios de diseño de cualquier esquema tarifario. La técnica de evaluación de alternativas aplicada en esta tesis tiene como objetivo

fundamental la selección de la estructura tarifaria a aplicar en el Área Metropolitana de Barcelona-AMB.

Las alternativas tarifarias estudiadas son *simples*: tarifa plana, kilométrica lineal; y *complejas*: kilométrica cóncava, tarifa de acceso + kilométrica lineal y cordón + kilométrica lineal. Para ello consideramos como criterios de selección la posibilidad de gestionar la demanda hasta los niveles deseados, la captación de ingresos brutos totales, la pérdida de excedente de usuario, la variación del bienestar social, la adaptación del esquema a la topología viaria existente y cumplir con otros requisitos. Los cuatro primeros criterios han sido cuantificados mediante la aplicación del modelo de esta tesis, los dos últimos corresponden a criterios de aceptabilidad y tecnológicos que el buen diseño del sistema tarifario debe cumplir.

La descripción jerárquica se representa en la figura 6.39. Una descripción descendente se consigue respondiendo a la pregunta “¿Cómo?”. La descripción ascendente responde a la pregunta “¿Por qué?”.

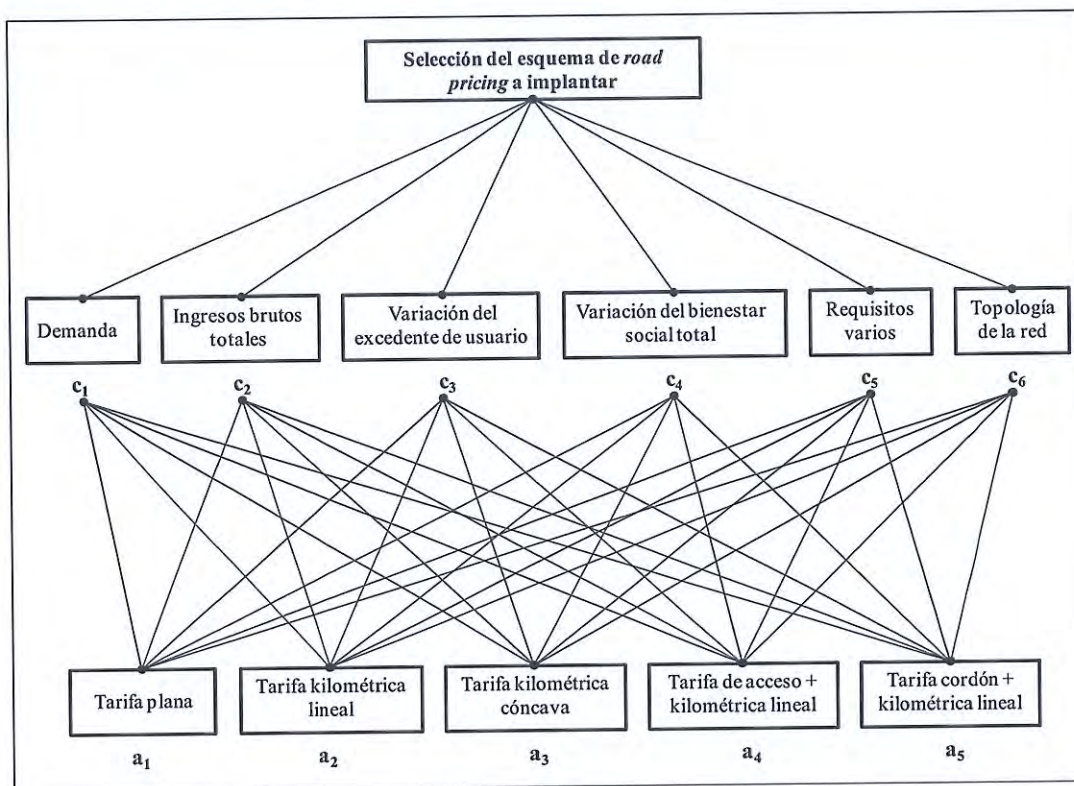


Fig. 6.39. Proceso analítico de jerarquización para seleccionar un esquema tarifario que gestione la movilidad.

Dentro de los criterios de aceptabilidad y tecnológicos se destacan:

- El diseño del esquema debe adaptarse a la topología viaria existente para evitar problemas de accesibilidad y efectos *spill-over*;
- Minimización de los puntos de cobro;

- Las tarifas deben variar según el área, hora del día, semana, año y tipo de vehículo;
- El método de tarificación debe ser fácil de entender para los usuarios,
- La tarifa debe ser aceptada como pago justo;
- Cualquier esquema debe promover la implantación y uso de ETC (*Electronic Toll Collection*);
- El sistema debe permitir que tanto visitantes como usuarios ocasionales sean equipados rápidamente y a bajo coste.

Definido el objetivo para seleccionar el esquema de *road pricing* en el AMB, comparamos los criterios dos a dos y se acuerda asignar los valores detallados en la tabla 6.12. En cada una de las matrices se cumple el concepto de reciprocidad y la matriz de comparación es consistente, puesto que se obtiene una razón de consistencia del 4,1% (IC=0,0461, IA=1,12, RC=0,041), con lo cual el vector de pesos seleccionado es válido.

Igualmente y considerando de forma particular cada uno de los criterios, se obtienen los pesos de las alternativas, de ese modo se ilustra en la tabla 6.12. El rango global de cada alternativa se encuentra asumiendo una utilidad lineal por multiplicación acumulada de los pesos de los diferentes niveles de jerarquía, tal como se describió en la metodología.

Tabla 6.12. Matrices de comparación y pesos.

| OBJETIVO FINAL: Seleccionar el esquema de <i>road pricing</i> a implantar | | | | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------------|---------------------------|
| | c ₁ | c ₂ | c ₃ | c ₄ | c ₅ | c ₆ | Pesos |
| c ₁ | 1 | 1/2 | 4 | 1/3 | 1/2 | 5 | w(c ₁)= 0,139 |
| c ₂ | 2 | 1 | 4 | 1/2 | 2 | 5 | w(c ₂)= 0,236 |
| c ₃ | 1/4 | 1/4 | 1 | 1/5 | 1/3 | 2 | w(c ₃)= 0,057 |
| c ₄ | 3 | 2 | 5 | 1 | 3 | 6 | w(c ₄)= 0,364 |
| c ₅ | 2 | 1/2 | 3 | 1/3 | 1 | 5 | w(c ₅)= 0,167 |
| c ₆ | 1/5 | 1/5 | 1/2 | 1/6 | 1/5 | 1 | w(c ₆)= 0,038 |
| CRITERIO 1: Reducción de la demanda | | | | | | | |
| | a ₁ | a ₂ | a ₃ | a ₄ | a ₅ | | Pesos |
| a ₁ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | w(a ₁ /c ₁)= | 0,200 |
| a ₂ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | w(a ₂ /c ₁)= | 0,200 |
| a ₃ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | w(a ₃ /c ₁)= | 0,200 |
| a ₄ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | w(a ₄ /c ₁)= | 0,200 |
| a ₅ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | w(a ₅ /c ₁)= | 0,200 |
| CRITERIO 2: Obtención de ingresos brutos futuros | | | | | | | |
| | a ₁ | a ₂ | a ₃ | a ₄ | a ₅ | | Pesos |
| a ₁ | 1 | 1/5 | 1/5 | 1/4 | 1/4 | w(a ₁ /c ₂)= | 0,047 |
| a ₂ | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | w(a ₂ /c ₂)= | 0,408 |
| a ₃ | 5 | 1/2 | 1 | 2 | 3 | w(a ₃ /c ₂)= | 0,269 |
| a ₄ | 4 | 1/3 | 1/2 | 1 | 2 | w(a ₄ /c ₂)= | 0,166 |
| a ₅ | 4 | 1/4 | 1/3 | 1/2 | 1 | w(a ₅ /c ₂)= | 0,109 |
| CRITERIO 3: Pérdida de excedente de usuario | | | | | | | |
| | a ₁ | a ₂ | a ₃ | a ₄ | a ₅ | | Pesos |
| a ₁ | 1 | 4 | 4 | 3 | 2 | w(a ₁ /c ₃)= | 0,405 |
| a ₂ | 1/4 | 1 | 1/2 | 1/3 | 1/4 | w(a ₂ /c ₃)= | 0,065 |
| a ₃ | 1/4 | 2 | 1 | 1/2 | 1/3 | w(a ₃ /c ₃)= | 0,099 |
| a ₄ | 1/3 | 3 | 2 | 1 | 1/2 | w(a ₄ /c ₃)= | 0,163 |
| a ₅ | 1/2 | 4 | 3 | 2 | 1 | w(a ₅ /c ₃)= | 0,267 |

Tabla 6.12. (Continuación) Matrices de comparación y pesos.

| OBJETIVO FINAL: Seleccionar el esquema de road pricing a implantar | | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------------|-------|-------|
| CRITERIO 4: Variación del bienestar social para toda la red | | | | | | | | |
| | a ₁ | a ₂ | a ₃ | a ₄ | a ₅ | | | |
| a ₁ | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | w(a ₁ /c ₄)= | 0,352 | |
| a ₂ | 1/3 | 1 | 1 | 1/3 | 1/3 | w(a ₂ /c ₄)= | 0,089 | |
| a ₃ | 1/3 | 1 | 1 | 1/3 | 1/3 | w(a ₃ /c ₄)= | 0,089 | |
| a ₄ | 1/2 | 3 | 3 | 1 | 1/2 | w(a ₄ /c ₄)= | 0,202 | |
| a ₅ | 1/2 | 3 | 3 | 2 | 1 | w(a ₅ /c ₄)= | 0,267 | |
| CRITERIO 5: Varios | | | | | | | | |
| | a ₁ | a ₂ | a ₃ | a ₄ | a ₅ | | | |
| a ₁ | 1 | 1/3 | 1/4 | 1/5 | 1/6 | w(a ₁ /c ₅)= | 0,047 | |
| a ₂ | 3 | 1 | 1/3 | 1/4 | 1/4 | w(a ₂ /c ₅)= | 0,087 | |
| a ₃ | 4 | 3 | 1 | 1/3 | 1/3 | w(a ₃ /c ₅)= | 0,160 | |
| a ₄ | 5 | 4 | 3 | 1 | 1/2 | w(a ₄ /c ₅)= | 0,298 | |
| a ₅ | 6 | 4 | 3 | 2 | 1 | w(a ₅ /c ₅)= | 0,408 | |
| CRITERIO 6: Topología de la red | | | | | | | | |
| | a ₁ | a ₂ | a ₃ | a ₄ | a ₅ | | | |
| a ₁ | 1 | 1/3 | 1/4 | 1/5 | 1/6 | w(a ₁ /c ₆)= | 0,047 | |
| a ₂ | 3 | 1 | 1/3 | 1/4 | 1/4 | w(a ₂ /c ₆)= | 0,087 | |
| a ₃ | 4 | 3 | 1 | 1/3 | 1/3 | w(a ₃ /c ₆)= | 0,160 | |
| a ₄ | 5 | 4 | 3 | 1 | 1/2 | w(a ₄ /c ₆)= | 0,298 | |
| a ₅ | 6 | 4 | 3 | 2 | 1 | w(a ₅ /c ₆)= | 0,408 | |
| Rango final de alternativas | | | | | | | | |
| Ra ₁ = | 0,028 | +0,011 | +0,023 | +0,128 | +0,008 | +0,002 | = | 0,200 |
| Ra ₂ = | 0,028 | +0,096 | +0,004 | +0,032 | +0,014 | +0,003 | = | 0,178 |
| Ra ₃ = | 0,028 | +0,063 | +0,006 | +0,032 | +0,027 | +0,006 | = | 0,162 |
| Ra ₄ = | 0,028 | +0,039 | +0,009 | +0,074 | +0,050 | +0,011 | = | 0,211 |
| Ra ₅ = | 0,028 | +0,026 | +0,015 | +0,097 | +0,068 | +0,015 | = | 0,249 |

Los resultados de este análisis jerárquico resumido en el rango final de cada alternativa, muestra que las estructuras compuestas (en primer lugar el cordón + kilométrica seguido por la tarifa de acceso + kilométrica) superan los esquemas simples (tarifa plana, tarifa kilométrica lineal y por último la tarifa kilométrica cóncava), en cuanto a los criterios escogidos para su selección.

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. Con una reducción del 11,8% en la cantidad de veh-km se alcanzaría una ganancia máxima de bienestar social de 93.221 €/h.