Investigaciones Económicas (Segunda época). Vol. XIII, n.º 2 (1989), págs. 183-205.

MEDICION DE LA DIFERENCIA EN CUANTO A COSTES SOCIALES POR CONGESTION ENTRE EL TRANSPORTE INDIVIDUAL Y TRANSPORTE PUBLICO URBANO. CON UNA APLICACION PARA EL AREA URBANA DE BARCELONA

Joaquín VERGES

Universidad Autónoma de Barcelona

El presente trabajo aborda uno de los aspectos clave para la determinación de las tarifas y de la subvención óptima al transporte público urbano: concretamente, la cuantificación de la diferencia entre el coste social por congestión generado por un pasajero adicional del transporte individual respecto al de un pasajero adicional del transporte público, dada una situación concreta del tráfico. Para ello se desarrolla un modelo de cálculo general que después es precisado y aplicado a los datos del tráfico urbano de Barcelona. Finalmente, los resultados obtenidos son discutidos tanto en cuanto a su utilización para determinaciones del porcentaje justificado de subvención sobre costes, como en cuanto a su grado de fiabilidad.

1. Introducción (naturaleza del problema y objetivos)

El planteamiento habitual sobre los costes por pasajero/kilómetro en el área de economía del transporte se basa, generalmente, en considerar que los costes están formados, por una parte, por los costes de funcionamiento derivados del vehículo y, por otra, por los tiempos de viaje de los pasajeros. Desde esta perspectiva, si existe un cierto grado de congestión en el tráfico (como es lo habitual en el transporte urbano), el coste marginal por pasajero/kilómetro será superior al coste medio, debido a que la entrada de un vehículo adicional en el tráfico reduce algo la velocidad media en el tramo considerado, aumentando, por tanto, los tiempos de viaje de todos los pasajeros de los vehículos afectados por tal aumento marginal de congestión. La diferencia entre el coste medio, que es lo que de hecho soporta el pasajero-adicional, y el coste marginal, es, pues, precisamente el coste representado por los incrementos en tiempos de viaje que el pasajero adicional impone sobre todos los demás pasajeros afectados; es decir, el coste social marginal (Walters, 1961).

Es algo evidente que este coste social es diferente según el modo de transporte: mayor para el transporte individual (automóviles), que para el transporte público (autobuses), por ejemplo. Dado esto, se admite generalmente que una

situación *first best* requeriría gravar cada modo de transporte con una tasa por pasajero/km igual al coste social que genera (Turvey/Mohring, 1975). Cuando esto no es posible (como así ocurre en la realidad en muchos casos, bien por no ser operativo en la práctica o por ser considerado políticamente como no conveniente), hay un general acuerdo en defender, como óptimo *second best*, el que las tarifas que pague el usuario del transporte público (TP) sean inferiores al coste estricto del servicio (lo que paralelamente implica que éste debe ser subvencionado), para compensar el hecho de que los costes sociales por pasajero/km son bastante inferiores que para el transporte individual (TI). Así pues, el objetivo que abordan los trabajos de esta línea de la economía del transporte es, básicamente, el de la determinación de cuál debería ser la tarifa óptima para el servicio público de transporte, y, por tanto, cuál la subvención a asignar a la empresa o ente que presta el servicio.

Tales estudios se basan en un criterio determinado de optimalidad *second best.* En general, éste ha consistido concretamente en considerar que la subvención socialmente justificable es aquella que permite una reducción de tarifas en el TP, de tal manera que haga que una parte de lo que serían viajeros potenciales del TI lo sean realmente del TP, disminuyendo así en consecuencia los costes sociales totales por congestión. Así, dada una situación concreta, el subsidio debería implantarse (o aumentarse) si la reducción de tarifas que permite genera una reducción de costes sociales mayores que dicho subsidio (Jackson, 1975; Glaister/Lewis, 1978; Else, 1985). De acuerdo con esto, la tarifa óptima sería aquella para la cual una ulterior reducción marginal genera una reducción de costes sociales por congestión igual al subsidio adicional requerido para ello (la mejora marginal social neta es nula).

Un criterio alternativo de optimalidad *second best* consistiría en argumentar que el hecho de que sean mayores los costes sociales por pasajero/km en el TI que en el TP, significa una asimetría entre ambos modos de transporte en cuanto a la diferencia entre el coste medio por pasajero/km (que es lo que soporta el pasajero) y el coste marginal respectivo. Y, dado que para el TI el coste medio es al mismo tiempo el «precio», si la tarifa del TP fuese la de cobertura de costes de funcionamiento del servicio, habría una mala asignación de los recursos entre ambos modos de transporte, ya que el precio se alejaría más del coste marginal en el TI que en el TP. Para evitarlo, sería necesario subvencionar el precio del TP precisamente por la diferencia existente entre los respectivos costes marginales (es decir, la diferencia entre sus costes sociales por pasajero/km).

Como puede verse, cualquiera que sea el criterio de optimalidad *second best,* la variable que resulta crucial es la diferencia entre el *coste social* por pasajero/km, en el TI con respecto al TP.

No obstante, a pesar de su trascendencia, es un hecho que no se dispone de estudios empíricos que evalúen directamente tal diferencia. Así, por ejemplo, en el trabajo de Glaister y Lewis citado, se llega a calcular cuál sería la subvención óptima al TP en el caso del área urbana del Gran Londres bajo el primer criterio de optimalidad *second best* mencionado, pero utilizando como valores

para los costes sociales por congestión de cada modo de transporte unas cifras estimadas, sobre las cuales la única referencia que aportan es que las utilizan «... sobre la base de consejos recibidos y de nuestra mejor información sobre la relación velocidad/flujo (de vehículos)...» (pág. 350). Asimismo, Bertrand (1978), en su trabajo sobre Bangkok, presenta sus resultados sobre costes sociales, pero directamente en términos relativos respecto a los costes soportados por los usuarios, debido a que la metodología que utiliza se basa en variables indirectas. Su conclusión más precisa —respecto al tema del presente trabajo— es que para el caso concreto de los vehículos privados, el coste social marginal representa un 60 por 100 de los costes soportados por un pasajero o coste social medio (pág. 255).

El objetivo del presente papel es presentar los resultados de un intento de evaluar precisamente esa magnitud clave: la diferencia en cuanto a costes sociales entre ambos modos de transporte urbano: el privado (automóviles) y el público (autobuses). Y ello concretamente para el caso de la ciudad de Barcelona.

Un planteamiento completo obligaría a considerar que los costes sociales originados por un vehículo, en el tráfico urbano, no se limitan a los de congestión, sino que genera otras externalidades negativas; especialmente todo lo referido a contaminación ambiental. No obstante, las presentes notas están exclusivamente centradas en los costes sociales por congestión —como, por otra parte, es habitual en los trabajos sobre el tema tarifas/subvenciones óptimas para el TP— y están referidas concretamente al tráfico urbano. Ahora bien, a diferencia de los trabajos citados, se tendrá aquí en cuenta que los efectos de la congestión marginal (disminución de la velocidad media) no sólo se manifiesta en un aumento de los tiempos de viaje de todos los pasajeros afectados, sino también en unos mayores costes-de-funcionamiento-por-kilómetro de los vehículos. (aunque, *a priori*, pueda estimarse que este componente tendrá una importancia bastante menor que el efecto derivado del aumento de los tiempos de viaje).

El trabajo está organizado como sigue. En la sección 2 se expone el enfoque y metodología adoptados y se precisa la terminología utilizada. En la sección 3 se describe el modelo de cálculo desarrollado para la evaluación de los costes sociales marginales. En la sección 4 se exponen los resultados obtenidos, en términos de costes sociales por pasajero/viaje adicional (para el TI y para el TP) para el área urbana de Barcelona. Finalmente, en la sección 5 se discuten los resultados obtenidos, en cuanto a su utilización para decisiones sobre tarifas y subvenciones, y en cuanto a las limitaciones que la información de base utilizada imponen sobre su interpretación.

2. Planteamiento y metodología

La cuestión se aborda desde la perspectiva de evaluar en qué medida los costes sociales por congestión por *pasajero/viaje*, son superiores en el TI que en el TP, en el caso del área urbana de Barcelona. El hecho de plantear el problema en

términos de pasajero/viaje en lugar de pasajero/km tiene su justificación principal en el hecho de que se presupone la existencia de una *tarifa única* para cualquier desplazamiento en cualquier bloque horario. Cuestión que en este caso (aplicación empírica al caso de la ciudad de Barcelona) venía ya políticamente decidida comdo uno de los elementos de partida del estudio del cual las presentes notas resumen una de sus partes[1]. No obstante, el proceso de cálculo permite igualmente determinar los costes sociales por pasajero/km.

El primer problema que plantea la evaluación de los costes sociales por pasajero/viaje, se deriva del hecho de que el tráfico urbano de pasajeros de cualquier ciudad es heterogéneo; tanto en el sentido de que la trama urbana está compuesta de vías de características muy diferentes, como porque los desplazamientos-viaje que efectúan los diferentes pasajeros no son desde luego idénticos, ni en las mismas condiciones de tráfico (horas «punta», no-punta).

En consecuencia, hay que tener en cuenta, por una parte, que la relación entre densidad de tráfico y velocidades medias, no es la misma en vías (calles) de uno o dos carriles típicas de las partes antiguas-céntricas de una ciudad-tipo europea, que en vías de trazado recto de tres o cuatro carriles y semáforos en los cruces, típicas de las zonas más modernas, ya que en éstas, para una misma densidad, la velocidad media es superior. Y esta diferencia aún es mayor, por ejemplo, si se trata de una vía urbana de dirección única con más de cuatro carriles y con una regulación semafórica preferente («onda verde»).

Y, por otra parte, que cada pasajero efectúa en principio un trayecto diferente al de los demás. Por ejemplo, el recorrido de una persona desde su domicilio a su lugar de trabajo. Aunque es evidente que en términos prácticos hay grandes similitudes que permitirían agrupar los centenares de miles de recorridos diarios individuales de pasajeros de una ciudad como Barcelona, en una serie de trayectos-tipo según la longitud de recorrido, según la composición del recorrido en cuanto a vías de diferente tipo utilizadas, y según el bloque horario del día en que se realiza.

Ante esta complejidad, no puede abordarse directamente la pregunta de cuál es el coste social medio de congestión por pasajero/viaje del TI (o del TP) en tal o cual ciudad, porque esto inmediatamente hace surgir otras preguntas: por pasajero/viaje, ¿en qué recorrido o trayecto?; ¿de qué longitud?; ¿en horas punta, o a las $11^1/_2$ de la mañana?; ¿en días laborables, en sábados o en festivos?; etc.

En consecuencia se hace necesario sistematizar esta complejidad, de manera que sea posible abordar el problema a un nivel mucho más desagregado. Principalmente porque la cuestión crucial en el estudio del coste social de la congestión es, como es bien sabido, evaluar la variación de las velocidades

[1] El estudio referido («Cuantificación de la subvención objetivamente justificable para "Transports Municipals de Barcelona S.P.M."», abril de 1986; U.A.B., Departamento de Economía de la Empresa, Bellaterra, Barcelona) fue efectuado por encargo de la sociedad Transportes Municipales de Barcelona, el Ayuntamiento de Barcelona y la Corporación Metropolitana de Barcelona.

medias de los diferentes vehículos al variar la densidad de tráfico. Y ésta es diferente, como se ha argumentado, según el tipo de vía urbana.

En esta línea, el planteamiento general elaborado, es el siguiente:

— Tipificar las diferentes VIAS (calles o segmentos de ellas) del área urbana en X categorías, según sus diferencias en cuanto a la relación densidad/velocidad media de los vehículos.
— Definir T TRAYECTOS concretos (de tal punto A de la ciudad a otro punto B), que en su conjunto constituyan una muestra representativa de los trayectos que efectúan los diferentes pasajeros.
— Descomponer cada TRAYECTO en TRAMOS, siendo un tramo la parte del recorrido del trayecto que corresponde a vías de categoría diferente.
— Dividir el estudio del tráfico por BLOQUES HORARIOS (horas «punta» de día laborable, horas «valle», etc.).

Esta sistematización permite plantear el problema en los siguientes términos desagregados:

1. Dado un tramo t (correspondiente a uno de los trayectos de la muestra) y teniendo en cuenta a cuál de las X categorías de vías urbanas corresponde, efectuar una secuencia de determinación que, esquemáticamente, puede resmirse así:

   Si Δ de 1 pasajero/viaje: $\rightarrow$ (¿) Δ densidad de tráfico en el tramo $\rightarrow$ (¿) ∇ velocidad media en él, $\rightarrow$ {(¿) Δ *tiempos de viaje* de los pasajeros afectados + (¿) Δ de los *costes de funcionamiento por kilómetro* de los vehículos afectados}; $\Rightarrow$ valoración de estos dos efectos finales.

2. Llevar a cabo la secuencia de determinaciones anterior *para cada bloque horario*, dado que para un mismo incremento de densidad, la reducción de velocidad es diferente, según sea precisamente la densidad del tramo; y un bloque horario (punta, no-punta) estará caracterizado precisamente por un nivel diferente de densidad media.

3. Efectuar los pasos descritos en 1 y 2 para cada uno de los *tramos* de cada *trayecto* de la muestra. Y determinar, por agregación, los costes sociales de congestión por pasajero adicional, en cada bloque horario, para cada uno de los trayectos de la muestra.

Efectuado lo anterior, permitirá obtener después unos promedios de los resultados de los diferentes trayectos de la muestra, para llegar a unos valores que sean válidos, como media, para un viaje-tipo en *cada bloque horario;* y, posteriormente, pueden promediarse estos últimos valores según la distribución anual del tráfico por bloques horarios, para determinar así un valor único que representaría el coste social promedio originado por el aumento de un pasajero/viaje, dadas las condiciones de tráfico de la ciudad (promedio único que pasa a ser la magnitud más significativa en el presente caso en que se trata de aplicar el modelo a una ciudad como Barcelona, en la que la tarifa del TP por viaje es, como se ha indicado, uniforme sea cual sea el trayecto y el bloque horario en que se realice aquél).

En lo que sigue de esta sección se desarrolla el planteamiento general expuesto anteriormente, y se precisa la terminología y variables utilizadas.

Tomando un tramo urbano determinado, éste vendrá caracterizado por su longitud en kilómetros (K), su número de carriles (R), por la densidad media del tráfico registrada en cada bloque horario (D_h), y por su pertenencia a una de las X categorías de vía urbana establecidas. Lo que significa que la relación «velocidad media/densidad» a utilizar, será la correspondiente a tal categoría de vía [$V = V_x(D)$]. (Entendiendo por densidad, el número de vehículos/tipo[2] por kilómetro de carril, en un momento determinado.)

Para simplificar, eludiremos en lo que sigue los diferentes subíndices indicativos tanto del bloque horario como de la categoría de la vía. Las expresiones que siguen se entienden referidas a un tramo concreto (es decir, de un tipo de vía determinado), y considerando un bloque horario determinado.

El primer paso en el desarrollo del modelo consistirá en determinar el efecto que sobre la densidad del tramo produce la entrada de un pasajero adicional. Pero para ello la cuestión central es por supuesto el disponer de la respectiva relación existente entre *velocidad media* (V) y *densidad* del tráfico en el tipo de tramo considerado: $V = V(D)$.

La relación más usualmente estudiada y utilizada en el área del transporte es, sin embargo, la de *velocidad/flujo*. (Entendiendo por flujo, el número de vehículos/tipo que recorren el tramo en un período de tiempo dado —generalmente una hora—.) Pero en nuestro caso, es la relación *velocidad/densidad* la relevante, ya que el concepto de coste social que se trata de evaluar se corresponde con el hecho de que la densidad aumente como consecuencia de la entrada de un pasajero/viaje más en el tramo en un momento determinado del día. La distinción es relevante, porque, como ha destacado Else (1981), la decisión de un viajero de incorporarse al tráfico de un tramo, afecta indudablemente al número de vehículos en el mismo (densidad), pero no necesariamente incrementará el flujo de vehículos por unidad de tiempo. Este puede *aumentar o disminuir*, según sea la situación en que se encuentre el tramo en cuanto a densidad en ese momento. Dado lo decisivo de esta cuestión para los objetivos del presente trabajo, se hace necesario precisarla algo más, utilizando la variable «tiempo medio de recorrido del tramo, para un pasajero», $t = K/V$:

Dada una situación concreta del tráfico en el tramo, el tiempo medio de recorrido es evidentemente una variable proxi del coste por tiempos de viaje por pasajero en ese tramo. De hecho, expresando el coste en unidades/hora y suponiendo que el precio sombra a aplicar a los tiempos de cada pasajero de un modo de transporte fuese el mismo, la variable t sería propiamente el coste medio (por pasajero/viaje) por tiempos de viaje.

[2] En el sentido de homogeneizar los diferentes vehículos, tomando el *espacio vial* de uno de ellos como unidad de cuenta. Es decir, no exactamente su longitud física, si no algo más, ya que las distancias de separación entre un vehículo y el que le precede y el que le sigue, son mayores en el caso de los vehículos pesados; y estas separaciones forman parte del espacio vial ocupado.

Y es evidente que dicha variable (tiempo de recorrido = t) puede ser expresada bien en función de la variable flujo (F), o bien en función de la variable densidad (D). Las dos funciones resultantes, así como la evidente relación existente entre ellas, se admite generalmente que responden a la pauta general definida en la figura siguiente (Else, 1981; Nash, 1982):

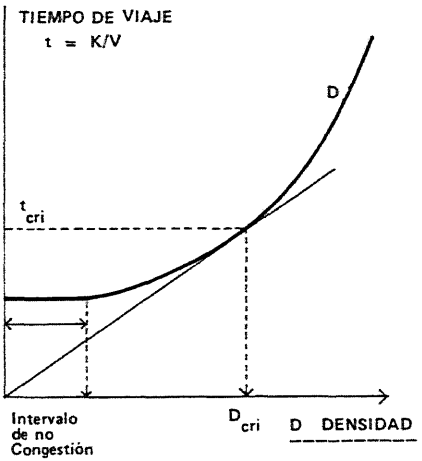

Gráfico 1.a

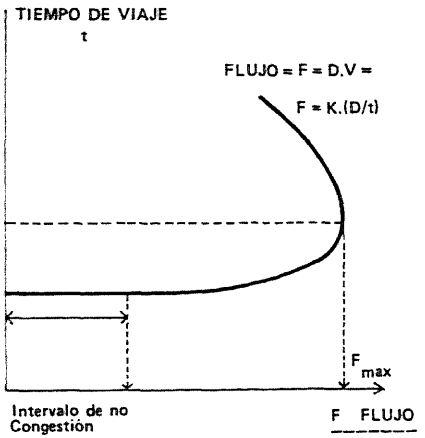

Gráfico 1.b

donde D_{cri} = densidad crítica del tramo; t_{cri} = tiempo de viaje crítico; y $F_{máx}$ = flujo máximo posible. Valores que corresponden precisamente a cuando el cociente D/t toma el máximo valor.

Es decir, que dado un flujo de vehículos en el tramo, el tiempo de recorrido (t) puede tomar dos valores sustancialmente diferentes, según sea la situación (densidad) del tramo en ese momento. Esto significa unos costes medios de viaje diferentes y, por tanto, con unos costes marginales (costes sociales por pasajero) diferentes de darse una u otra situación.

De ahí que optemos como mejor alternativa por basarnos en la relación densidad ↔ tiempos de viaje, que no presenta la dificultad anterior en cuanto a la evaluación de los costes marginales por pasajero en el tramo. Y esto implica (dado que la variable K —longitud del tramo— es una constante) el optar por utilizar la relación *velocidad/densidad* en lugar de la tradicional relación *velocidad/flujo*.

En cualquier caso, dada la denominada ecuación fundamental del tráfico, FLUJO = DENSIDAD × VELOCIDAD, es evidente que implícitamente estaremos teniendo en cuenta la relación velocidad/intensidad. Dicha relación técnica es

generalmente expresada en términos de intervalos de una hora. Y, dado que se utilizará en lo que sigue, efectuaremos una formulación algo más precisa:

$$F/R = D \cdot V \rightarrow F = D \cdot V \cdot R \qquad [1]$$

$$\rightarrow D = \frac{F}{V \cdot R} \qquad [2]$$

$$V = V(D) \quad ; \quad [V'(D) < 0] \qquad [3]$$

$$t = K/V \qquad [4]$$

donde: F = flujo de vehículos que entran en el tramo en una hora; R = número de carriles de la vía; D = número de vehículos/tipo, existentes en promedio, por kilómetro de carril; V = velocidad media de los vehículos (desde la entrada hasta la salida del tramo), en kilómetros por hora, y t = tiempo medio de viaje para recorrer el tramo, en horas.

Implícito en lo anterior está el concepto de *carga de vehículos* (C) del tramo, que corresponde al número de vehículos/tipo que en promedio están circulando por el tramo en un momento determinado.

$$C = F \cdot t = F \cdot (K/V) \qquad [5]$$

En resumen: dados los parámetros del tramo (K y R), nuestro enfoque se basará en las relaciones $V = V(D)$ y $D = D(C)$. Relación esta última que, de acuerdo con [5] y [1] puede expresarse como:

$$D = \frac{C}{K \cdot R} \qquad [6]$$

Expresión que será el punto de partida, ya que, como se ha visto, la decisión de un pasajero —por ejemplo, del TI, para simplificar— se traducirá necesariamente en un aumento de la carga del tramo, pero no necesariamente en un incremento del flujo, como ilustra la figura 1b).

3. Modelo utilizado para la determinación de los costes sociales por pasajero

Precisada la terminología se explicita a continuación el modelo de cálculo, según los pasos enunciados al principio. Por razones prácticas, el planteamiento se desarrolla concretamente para el efecto de un pasajero/viaje adicional del TI. (Las expresiones para el caso del efecto de un pasajero/viaje adicional del TP de superficie son completamente simétricas).

3.1. *Determinación de los costes sociales marginales por incremento de los tiempos de viaje*

a) Aumento de densidad de tráfico por pasajero adicional del TI en un bloque horario dado

Llamando *adi* al incremento de la densidad del tráfico al aumentar un pasajero/viaje del TI, tal incremento será el derivado del incremento marginal de carga que suponga tal pasajero adicional. Y teniendo en cuenta que el número de pasajeros del TI en el tramo (Pi) depende de la carga de vehículos que corresponde al TI y del número medio de pasajeros por vehículo/tipo del TI (Oi = índice de ocupación),

$$Pi = C \cdot Oi \qquad [7]$$

podemos escribir el incremento marginal de densidad que se producirá como:

$$adi = \frac{dD}{dPi} = \frac{dD}{dC} \cdot \frac{dC}{dPi} = \frac{1}{K \cdot R} \cdot \frac{1}{Oi} = \frac{1}{K \cdot R \cdot Oi} \qquad [8]$$

b) Reducción marginal de velocidad correspondiente

Esta reducción será tanto mayor como congestionado este el tráfico. Es decir, dependerá de cuál sea la velocidad media que se dé en ese momento en el tramo (V^0) (lo cual, a su vez, *depende de cuál sea el bloque horario considerado).*

Supongamos que se conoce la relación existente entre velocidad y densidad para los vehículos del TI en el tramo en estudio[3] (funciones [3]). Entonces, la reducción marginal de velocidad ocasionada (rvi) será, por tanto:

$$rvi = \frac{dV}{dPi} = \frac{dV}{dD} \cdot \frac{dD}{dPi} = \frac{dV}{dD} \cdot adi \qquad [9]$$

Expresión que, por razones prácticas de cálculo la aplicaremos en su equivalente en términos de diferencia de velocidades:

$$rvi = V(D^0) - V(D^0 + adi) = V^0 - V(D^0 + adi) \qquad [10]$$

[3] De hecho, determinar tal relación es la cuestión clave en el tema que estamos considerando. Pero difícil de resumir en pocas líneas. Esto, y su carácter más de ingeniería de tráfico que de análisis económico, ha aconsejado el dejar este apartado de la investigación para su exposición en otro trabajo. Aquí supondremos, pues, como simplificación expositiva, que conocemos dicha relación, que, como se ha expresado antes, será diferente según el tramo en estudio corresponda a un tipo de vía o a otro: $V = V_x(D)$.

donde D^0 es la densidad media observada en el tramo para el bloque horario considerado[4]. Y V^0 es la velocidad media simultáneamente observada.

c) AUMENTO DE LOS TIEMPOS DE VIAJE DE CADA UNO DE LOS PASAJEROS AFECTADOS

El aumento del tiempo de viaje para atravesar el tramo, para cada pasajero, dependerá de la reducción marginal anterior, pero también de la velocidad absoluta inicial (V^0) respecto a la que se produce tal reducción. Así, por ejemplo, una reducción de 1 km/h en la velocidad, en un tramo de 4 km, si la velocidad media de partida es 60 km/h, origina un aumento del tiempo de viaje de los pasajeros del tramo de 0,0678 minutos, mientras que si la velocidad media de partida es de 30 km/h, el aumento es de 0,1379 minutos.

Así, para cada pasajero que se encuentra atravesando el tramo, el aumento del tiempo de viaje ocasionado por la entrada de un pasajero adicional del TI será:

a) Para los pasajeros del TI afectados:

$$(ati)_1 = \frac{K}{Vi^0 - rvi} - \frac{K}{Vi^0} = \frac{K \cdot rvi}{Vi^0 \cdot (Vi^0 - rvi)} \qquad [11]$$

b) Para los pasajeros del TP afectados

$$(ati)_u = \frac{K}{Vu^0 - rvi} - \frac{K}{Vu^0} = \frac{K \cdot rvi}{Vu^0 \cdot (Vu^0 - rvi)} \qquad [12]$$

donde Vi^0 es la velocidad media observada para los vehículos del TI y Vu^0 es la velocidad media observada para los vehículos del TP[5].

d) INCREMENTO EN LOS TIEMPOS DE VIAJE TOTALES

Las pérdidas totales de tiempo impuestas por el aumento de la congestión derivada de la entrada de un pasajero adicional del TI, será el resultado de multiplicar el anterior aumento individual por el número de personas que se ven afectadas. O sea, por el número de viajeros que entran en el tramo desde que lo hace el pasajero adicional hasta que éste acaba de cruzarlo (que es el tiempo que dura el incremento de congestión y, por tanto, la reducción de

[4] La información disponible en la práctica no es sobre mediciones de densidad, sino sobre mediciones de intensidad del tráfico en un tramo determinado (medición del flujo de vehículos para cada período de una hora —o cuarto de hora— a lo largo del día), y mediciones sobre velocidades medias. No obstante, conociendo el tipo de tramo, la densidad media «observada» puede medirse indirectamente a través de aplicar la relación básica del tráfico [1].

[5] Estas fórmulas de cálculo presuponen que, si bien las velocidades medias del TI y del TP son diferentes, la reducción marginal de velocidad que sufren como consecuencia de un aumento marginal de la densidad, es la misma (la variable *rvi* es la misma en ambas expresiones). Simplificación que estimamos puede considerarse en términos prácticos como una aproximación suficientemente válida.

velocidad). Se trata, como puede verse, de un concepto paralelo al de *carga de vehículos*, ya que corresponde precisamente a los pasajeros que supone dicha carga de vehículos. Designaremos a dicho número de personas como *carga de pasajeros* (*CP*»). Su determinación obliga, no obstante, a considerar la carga de vehículos no en términos de equivalente en unidades de vehículo estándar (C) como hasta ahora, sino en términos del número de vehículos observados de cada tipo. Esto tropieza con el inconveniente de que la información de que se dispone en la práctica respecto a un tramo dado en un bloque horario determinado, se refiere a la suma de vehículos totales (sean del tipo que sean, ya que el contaje es por medios mecánicos) que atraviesan un tramo por unidad de tiempo. Es decir, al flujo, pero expresado en términos de *unidades de vehículos heterogéneos* (F^*). Y, por tanto, la carga de vehículos que puede calcularse a partir de aquí, tendrá también el mismo carácter de carga heterogénea:

$$C^* = F^* \cdot (K/V^0) \qquad [13]$$

Dado este carácter inevitablemente global de los datos empíricos disponibles, se hace necesario efectuar una desagregación por tipo de vehículos. La que se ha efectuado, a los efectos del presente trabajo, ha consistido en distinguir cinco tipos: 1 = turismos; 2 = motos; 3 = furgonetas; 4 = camiones; 5 = autobuses-/autocares. Y en establecer las siguientes variables como coeficientes a determinar:

E_j = Participación del vehículo tipo j sobre el número observado de vehículos totales ($\Sigma E_j = 1$) en el bloque horario considerado.
O_j = Indice medio de ocupación (número de pasajeros) de un vehículo tipo j, en el bloque horario considerado.
L_j = Longitud de espacio vital de carril ocupado por un vehículo tipo j.
(j = 1, 2, 3, 4 y 5).

Aplicando los coeficientes de estructura del tráfico (E_j) la carga observada (C^*), puede expresarse, para cada tipo de vehículo, como:

$$C_j^* = C^* \cdot E_j \qquad [14]$$

Y, por tanto, la carga de pasajeros será:

$$CP = \sum_{j=1}^{5} C_j^* \cdot O_j = \sum_{j=1}^{5} C^* \cdot E_j \cdot O_j \qquad [15]$$

(carga de pasajeros que será también diferente para cada bloque horario en la medida en que C^*, es diferente, y además porque los vectores E y O pueden también ser diferentes).

Para poder relacionar esto con los pasos anteriores, es necesario transformar la variable Carga observable, C^* (vehículos heterogéneos) en la variable que hemos venido utilizando antes de *carga en términos de vehículos estándar* (C) en

cuanto a longitud vial ocupada. Tomando como vehículo estándar, en cuanto a espacio vial (L), el turismo medio ($L_1 = L$), este paso puede hacerse como:

$$C = \sum_{j=1}^{5} C_j^* \cdot L_j/L = \sum_{j=1}^{5} C^* \cdot E_j \cdot L_j/L = C^* \cdot \sum_{j=1}^{5} E_j \cdot L_j/L \qquad [16]$$

lo que permite expresar [15] (el número de pasajeros que se ven afectados por la reducción de velocidad) como:

$$CP = C \cdot \frac{\Sigma E_j \cdot O_j}{\Sigma E_j \cdot L_j/L} \qquad [17]$$

y teniendo en cuenta que, de acuerdo con [6], $C = D \cdot K \cdot R$, la carga de pasajeros media puede expresarse en términos de variables homogeneizadas (en términos de vehículos estándar) como[6]:

$$CP = D \cdot K \cdot R \cdot \frac{\Sigma E_j \cdot O_j}{\Sigma E_j \cdot L_j/L_1} \qquad [18]$$

Esto permite finalmente determinar la *pérdida total de tiempos debido al incremento marginal de congestión,* multiplicando las expresiones [11] y [12], respectivamente, por la [15], si disponemos del reparto de la carga de pasajeros entre el TI y el TP ($CPi + CPu = CP$).

Sin embargo, dada la dificultad que representa el disponer de mediciones de pasajeros/viaje de un tramo en uno y otro modo de transporte, supondremos, como una aproximación suficientemente aceptable, que las proporciones respectivas son las que, en general, se dan en el tráfico urbano total de la ciudad; es decir, el *modal splitting* general. Así, siendo m la proporción de pasajeros viaje en TI, $CPi = CP \cdot m$ y $CPu = CP \cdot (1 - m)$.

[6] Expresión que, por otra parte, tiene una interpretación lógica directa: supongamos que todos los vehículos circulando por el tramo fuesen del tipo tomado como unidad de cuenta (en nuestro caso, el turismo medio). Si la densidad es, por ejemplo, de 60, el tramo es de 1,5 km y tiene cuatro carriles, la carga media de vehículos durante el período considerado será de $60 \times 1{,}5 \times 4 = 360$. Y si el índice medio de ocupación (Oi), es igual a 1,3, el número de viajeros afectados por la reducción de velocidad sería de $360 \times 1{,}3 = 468$ (en este caso, $\Sigma E_j \cdot O_j$ sería igual a $O_i \equiv Oi$; y $L_j \equiv L_i \equiv Li$; y, por tanto, el quebrado quedaría reducido a Oi). Si, por el contrario, se pasa a suponer que una parte de los vehículos son autobuses, el número de viajeros resultante será superior, ya que el numerador del quebrado (que es el promedio ponderado de los índices de ocupación) será superior al denominador (que es el promedio ponderado de los espacios viales relativos de los diferentes tipos de vehículos).

En resumen, la suma de las pérdidas de tiempo de viaje que ocasiona un pasajero adicional del TI a los pasajeros afectados del tramo correspondiente será:

a) Para los pasajeros del Ti afectados:

$$(PTi)_i = \frac{K \cdot rvi}{Vi^0 \cdot (Vi^0 - rvi)} \cdot D \cdot K \cdot R \cdot \frac{\Sigma E_j \cdot O_j}{\Sigma E_j \cdot L_j/L} \cdot m \qquad [19]$$

b) Para los pasajeros del TP afectados:

$$(PTi)_u = \frac{K \cdot rvi}{Vu^0 \cdot (Vu^0 - rvi)} \cdot D \cdot K \cdot R \cdot \frac{\Sigma E_j \cdot O_j}{\Sigma E_j \cdot L_j/L} \cdot (1 - m) \qquad [20]$$

Siendo la pérdida total de tiempos la suma de ambas expresiones:

$$PTi = (PTi)_i + (PTi)_u{}^7 \qquad [21]$$

e) La evaluación del coste social correspondiente

En resumen, dado un tramo concreto, y para un bloque horario determinado, *el coste social por pasajero adicional del TI* resultará de la valoración de las pérdidas de tiempo anteriores, aplicando unos precios-sombra adecuados:

$$cti = \sum_{z=1}^{z} PTi_z \cdot W_z \qquad (\Sigma\, PTi_z \equiv PTi) \qquad [22]$$

donde W_z es el precio-sombra por hora para la pérdida de tiempo del pasajero/-viaje del tipo z; en el sentido de tener en cuenta que la valoración del tiempo perdido puede no ser la misma para las distintas personas que se ven afectadas (lo cual no tiene nada que ver con si son del TP o del TI, o si se desplazan durante un bloque horario u otro; sino que depende del coste de oportunidad

[7] Siendo [19] y [20] las expresiones finales, conviene efectuar la siguiente observación al respecto: si las dividimos por la longitud del tramo (K) tendremos las pérdidas de tiempo por kilómetro de tramo; magnitud que podría compararse para los diferentes tramos y/o para los diferentes bloques horarios en un mismo tramo. La expresión que resultaría seguiría, no obstante, teniendo como multiplicador la variable longitud (K). Y puede parecer paradójico que las pérdidas de tiempo *por kilómetro* dependan de que el tramo para el que se calculan sea más o menos largo; ya que en principio esto no debería afectar, puesto que sólo las diferentes condiciones del tráfico podrían hacer que las pérdidas de tiempo por kilómetro fuesen mayores o menores. Sin embargo, esta aparente contradicción de la fórmula tiene su explicación lógica: hay que tener en cuenta que el aumento de densidad de que se parte, y del cual dependen las *rvi*, es inferior si el tramo es de 1.200 m que si es de 600 (concretamente sería la mitad, pero a su vez *afectará al doble número de pasajeros)*. Así, puede interpretarse en las expresiones [19] y [20], a una de las variables K como la compensación del hecho anterior, dado el proceso de cálculo seguido. De hecho, pues, sí será prácticamente indiferente la longitud del tramo, a los efectos de calcular las pérdidas de tiempo *por kilómetro* (como depués puede comprobarse en la aplicación del modelo).

del tiempo para cada persona). Así, sería lógico proponer la utilización de diferentes precios-sombra por hora perdida, según se trate de pasajeros por motivos de trabajo, de estudio, de compra o de ocio. Y dentro de cada uno de los casos, según la apreciación subjetiva del valor de su tiempo para cada individuo. Por ejemplo, asignando un precio-sombra más alto para los tiempos perdidos por persona con nivel alto de ingresos.

No obstante, esta asignación de «precios-sombra» tropieza en nuestro caso con dificultades adicionales a las de definir cada tipo de viajero. Así, por ejemplo: el exceso de tiempo de viaje por congestión del tráfico, ¿es un tiempo totalmente perdido para un conductor de un turismo que va escuchando música o repasando un curso de idomas en el «radio-cassette»? O bien, ¿puede considerarse que una persona valora menos el tiempo que le hace perder la congestión cuando se desplaza por motivos de compras que cuando se desplaza por motivos de trabajo? Son numerosas las cuestiones de este tipo que pueden irse planteando; lo que hace que cualquier intento de establecer «precios-sombra» diferenciados, tropiece con dificultades insalvables, ya que se carece en gran parte de unas bases objetivas mínimas. Es por ello que en el presente estudio se ha optado para utilizar *un único «precio-sombra»* para valorar las horas perdidas; habiendo elegido como tal la magnitud de «retribución media por hora trabajada», según el Instituto Nacional de Estadística (W). En consecuencia:

$$cti = PTi \cdot W \qquad [23]$$

3.2. *Los costes sociales por mayores costes de funcionamiento de los vehículos de un tramo*

El cálculo de esta parte del coste social por congestión, exige determinar la relación existente entre velocidades medias y costes de funcionamiento por kilómetro, para los diferentes tipos de vehículo. Esto implica aspectos técnico-económicos que dependen de las características de los vehículos circulantes, y, en menor medida, de las características físicas de las vías de la ciudad (grado medio de pendientes, rugosidad del pavimento, etc.). Estos costes de funcionamiento comprenden básicamente: *a*) consumo de combustible; *b*) gastos de mantenimiento y reparaciones; y *c*) parte proporcional del coste del vehículo. Todo ello expresado en costes por kilómetro. Costes que la evidencia empírica muestra que son mayores al circular a velocidades medias inferiores a la óptima. Así, llamando CF_j a los costes de funcionamiento por kilómetro, para un vehículo de la clase j, es necesario conocer las relaciones:

$$CF_j = f_j(V) \quad ; \quad (CF_j' < 0) \qquad [24]$$

Partiendo de la reducción marginal de velocidad que impone la entrada de un pasajero adicional del TI en el tramo (rvi), su incidencia en términos de

mayores costes de funcionamiento *por kilómetro* de los vehículos afectados (*afi*), podemos expresarla —para un bloque horario determinado— como:

$$afi_j = f_j(V_j^0 - rvi) - f_j(V_j^0) \qquad [25]$$

y, en consecuencia, el coste social total originado (*cfi*) será:

$$cfi = \sum_{j=1}^{5} afi_j \cdot K \cdot C_j^* \qquad [26]$$

Por otra parte, dado que C_j^* puede escribirse —de acuerdo con [6] y [16] como,

$$C_j^* = \frac{D \cdot K \cdot R}{\Sigma E_j \cdot L_j/L} \cdot E_j \qquad [27]$$

el coste social definido por [26] puede expresarse, en variables más directas, como:

$$cfi = \Sigma afi_j \cdot K^2 \cdot E_j \cdot \frac{D \cdot R}{\Sigma E_j \cdot L_j/L} \qquad [28]$$

La cuestión clave adicional en este punto reside, por tanto, en disponer de las relaciones técnico-económicas entre la velocidad media de un tipo de vehículo y sus costes de funcionamiento por kilómetro (funciones $f_j(V)$), cuestión que, por las mismas razones indicadas para las funciones técnicas $V = V_x(D)$, se aborda en el trabajo aparte mencionado antes. Dando aquí por conocidas tales funciones, se expone en el apartado siguiente la aplicación del modelo al tráfico urbano de la ciudad de Barcelona, y se resumen los resultados obtenidos.

Resultará útil señalar previamente, y a modo de recapitulación, que las variables que entran en juego son: 1) parámetros a determinar para cada tramo concreto de cada trayecto de la muestra: K y R; 2) medición específica del tráfico en cada tramo, para cada bloque horario: D_h (o bien $I = F_h$); 3) parámetros a determinar para el tipo de tramo en general, pero diferenciados por bloque horario: $Vi_{x,h}^0$ y $Vu_{x,h}^0$; 4) la variable clave, $rvi_{x,h}$ que depende de las funciones $V = V_x(D)$ a aplicar al tipo de tramo de que se trate; 5) parámetros generales, válidos para cualquier tramo, pero diferentes según el bloque horario correspondiente: $E_{j,h}$ y $O_{j,h}$; 6) parámetros constantes para cualquier tramo y para cualquier bloque horario: L_j, m y $W_.$; y 7) las funciones $f_j(V)$, para cada tipo de vehículo.

4. Aplicación del modelo

En primer lugar se han establecido cinco categorías de vías urbanas. Desde la más desfavorable en cuanto a la relación velocidad/densidad (tipo 1: vías de un carril, de trama urbana densa e irregular, típica de barrios antiguos, por ejemplo), a la más favorable (tipo 5: vías rápidas de cuatro o más carriles, con regulación semafórica preferente y «onda verde»).

Y en cuanto a bloques horarios, se han estipulado en principio tres: 1) períodos «punta»; 2) períodos «valle» diurnos; y 3) período nocturno (de 22 horas a las 6 horas); siendo este último considerado como un período en el que no existe grado alguno de congestión.

En cuanto a la determinación de los trayectos que habían de componer la muestra, se ha efectuado un estudio de los flujos de desplazamientos urbanos de personas en el área de Barcelona, en base a la «Encuesta de Movilidad Obligada, 1981», elaborada por la Corporación Metropolitana de Barcelona. Esta encuesta divide el área urbana en 155 zonas, recogiéndose los flujos de desplazamientos entre cada par de estas zonas (lo que supone un elevado grado de detalle: 23.870 tipos de desplazamientos posibles). Esto se ha completado con una reelaboración de los datos de la encuesta, dividiendo el área urbana en 16 zonas (240 tipos de desplazamientos). Del conjunto se han escogido siete trayectos urbanos concretos que, por sus características (importancia en cuanto a flujo de pasajeros, composición por tipo de tramos y longitud), pudiesen ser considerados como una muestra representativa del conjunto de desplazamientos urbanos anuales mediante vehículo. (Hay que hacer constar al respecto que la fracción de desplazamientos que se realizan a pie, no es negligible.)

Subdivididos estos trayectos en tramos (cada uno correspondiente a un tipo de vía), se ha determinado para cada tramo sus parámetros básicos, así como los flujos de vehículos correspondientes, resultando los datos básicos de partida recogidos en el Cuadro 1.

Como parámetros generales del tráfico de la ciudad, de las determinaciones/-mediciones llevadas a cabo han resultado los siguientes coeficientes:

Tipo vehículo	Estructura del tráfico (total vehículos = 1)		Indices medios de ocupación		Longitudes medias vehículo (espacio vial)
	en hora punta	en hora valle	hora punta	hora valle	
1. Turismos	0,87	0,8645	1,55	1,55	4,135 m
2. Motos	0,051	0,051	1	1	2 m
3. Furgonetas	0,044	0,044	1,6	1,6	5 m
4. Camiones	0,028	0,028	1,6	1,6	9 m
5. Autobuses	0,007	0,0125	55	20	11 m

CUADRO 1
Datos Básicos

	Tramos							Total
	1.º	2.º	3.º	4.º	5.º	6.º	7.º	
Trayecto I								
— Tipo de vía	1	4	4	3	3	4	1	
— K	0,1	0,6	2,25	0,5	0,5	0,3	0,1	4,35
— R	1	3	4	2	4	3	1	
— F^*/R h. punta		697	774	484	534	650		
— F^*/R h. valle diurnas.		533	528	353	397	454		
Trayecto II								
— Tipo de vía	1	4	4	3	3	3	1	
— K	0,1	1	0,35	1,1	1,2	0,2	0,1	3,95
— R	1	4	5	4	3	2	1	
— F^*/R h. punta		639	691	441	537	484		
— F^*/R h. valle diurnas.		495	499	386	433	353		
Trayecto III								
— Tipo de vía	1	4	5	5	5	5	1	
— K	0,15	1,9	2,7	1	2	0,1		7,85
— R	1	4	3	5	5	1		
— F^*/R h. punta		629,4	1.007	686	686			
— F^*/R h. valle diurnas.		341,3	735	465,2	465.2			
Trayecto IV								
— Tipo de vía	1	2	3	3	2	1		
— K	0,1	0,7	0,25	1,2	0,45	0,1		2,8
— R	1	3	4	2	4	3	1	
— F^*/R h. punta		278	470	484	245			
— F^*/R h. valle diurnas.		183	295	319	170			
Trayecto V								
— Tipo de vía	1	3	1	1	5	4	1	
— K	0,15	1,5	0,5	0,4	2,7	2,6	0,1	7,95
— R	1	3	1	1	2	4	1	
— F^*/R h. punta		583,6		1.067	890			
— F^*/R h. valle diurnas.		381		840	633			
Trayecto VI								
— Tipo de vía	1	4	5	3	3	1		
— K	0,05	2,6	1,35	0,15	0,9	0,4		5,45
— R	1	4	2	2	4	2		
— F^*/R h. punta		617	1.057	486	534			
— F^*/R h. valle diurnas.		426	932	337	397			
Trayecto VII								
— Tipo de vía	1	2	4	3	3			
— K	0,1	0,65	1,25	1,1	0,1			3,2
— R	1	5	5	4	4			
— F^*/R h. punta		373	780	594	594			
— F^*/R h. valle diurnas.		323	651	452	452			

Finalmente, del estudio de la distribución observada de pasajeros/viaje entre TI y TP *(modal splitting)* hemos obtenido unos valores de 69,3 y 30,7 por 100, respectivamente ($m = 0{,}693$). Y en cuanto a la «retribución media por hora trabajada», que es lo que se toma como «precio-sombra» para valorar los mayores tiempos de viaje, para 1984 es (de acuerdo con el Anuario del INE) $W = 528$ ptas.

Previa determinación de las funciones $V = V_x(D)$; $(X = 1, 2, ..., 5)$, una para cada tipo de vía, así como de las funciones $f_j(V)$ $(j = 1, 2, ..., 5)$ de costes de funcionamiento por kilómetro, para cada tipo de vehículo, se ha aplicado el modelo descrito en la sección anterior; primero para un pasajero adicional del TI y después para uno del TP de superficie.

Al llevar a cabo esta aplicación se puso de manifiesto una dificultad adicional: que dentro de los propios períodos punta (cuya ubicación horaria no coincide exactamente para todos los tramos de la muestra), se da también la circunstancia descrita en el gráfico 1 de que, para un mismo flujo de vehículos, la velocidad puede ser drásticamente diferente, dependiendo de si se ha superado o no el punto crítico de densidad a partir de la cual empieza a haber retenciones de vehículos en la entrada del tramo. Esto ha obligado a distinguir dos bloques horarios de períodos punta en lugar de uno: *períodos punta pre-críticos,* definidos porque todos los vehículos que intentan entrar en el tramo lo hacen, aunque sea a una velocidad decreciente; y *períodos punta post-críticos* o con-retención-de-vehículos, definidos como aquellos en los que el tramo registra entradas y salidas (es decir, no está necesariamente colapsado), pero no absorbe todos los vehículos que intentan entrar en el mismo. En estos períodos de máxima densidad, la velocidad media cae en picado, y el flujo disminuye (tramo hacia la izquierda en el gráfico 1b). Mientras que en los períodos punta pre-críticos la relación de causa a efecto es inversa: el flujo es el «natural» (aquél que corresponde al número de vehículos que deciden utilizar el tramo), y es éste el que determina la densidad —y, por tanto, la velocidad media— que dará en el mismo.

Efectuada esta distinción —que puede anticiparse que resulta crucial para la medición de los costes sociales de la congestión—, se han obtenido los resultados resumidos en el Cuadro 2 (en pesetas de 1984).

5. Discusión y resumen de los resultados obtenidos

Como se ve, los resultados muestran unas diferencias muy fuertes entre el bloque horario «períodos punta-con-retención» y los otros dos. Esto ha obligado a una determinación al mayor grado de precisión que posibilitaba la información disponible, de cómo se reparte el tráfico de un día laborable entre los tres períodos diurnos. Dicha determinación se ha llevado a cabo a partir de mediciones del flujo de tráfico de cada tramo de la muestra, para intervalos de un cuarto de hora; lo que ha permitido calcular la ubicación y duración aproximada de los cortos intervalos de punta-con-retención, los cuales asocia-

CUADRO 2
Resultados

TRAYECTO I	Costes de congestión por pasajero adicional del TI			Costes de congestión por pasajero adicional del TP		
	Punta precrítica *cti* *cfi*	Punta con retenc. *cti* *cfi*	Valle diurno *cti* *cfi*	Punta precrítica *ctp* *cfp*	Punta con retenc. *ctp* *cfp*	Valle diurno *ctp*
cfp						
Tramo 1.º	0,08 + 0,004	0,08 + 0,004	0,05 + 0,004	0,01 + 0,0009	0,01 + 0,0009	0,1 + 0,0006
Tramo 2.º	1,04 + 0,08	34,84 + 2,6	0,7 + 0,05	0,17 + 0,01	5,86 + 0,43	0,12 + 0,009
Tramo 3.º	5,09 + 0,3	93,57 + 5,38	2,58 + 0,15	0,87 + 0,05	16,02 + 0,92	0,44 + 0,02
Tramo 4.º	0,56 + 0,06	72,3 + 7,56	0,41 + 0,04	0,09 + 0,01	11,69 + 0,64	0,07 + 0,008
Tramo 5.º	0,64 + 0,03	79,23 + 4,23	0,46 + 0,02	0,1 + 0,06	13,1 + 0,7	0,07 + 0,004
Tramo 6.º	0,64 + 0,03	20,83 + 1,52	0,28 + 0,02	0,07 + 0,006	3,42 + 0,25	0,04 + 0,003
Tramo 7.º	0,08 + 0,004	0,8 + 0,004	0,05 + 0,004	0,01 + 0,0009	0,01 + 0,0009	0,01 + 0,0006
Sumas	7,94 + 0,5	300,93 + 21,29	4,53 + 0,28	1,32 + 0,08	50,11 + 2,94	0,76 + 0,05
y así para los demás,						
Trayecto II	5,17 + 0,3	438,65 + 28,02	3,91 + 0,23	0,85 + 0,05	73,45 + 4,64	0,65 + 0,03
Trayecto III	11,49 + 0,79	604,56 + 32,42	6,56 + 0,38	1,94 + 0,10	103,08 + 5,5	1,12 + 0,05
Trayecto IV	2,74 + 0,18	200,81 + 15,04	1,9 + 0,14	0,44 + 0,03	33,17 + 2,51	0,32 + 0,02
Trayecto V	19,34 + 1,54	369,74 + 29,58	9,61 + 0,79	3,29 + 0,24	62,46 + 5,03	1,63 + 0,11
Trayecto VI	8,63 + 0,69	385,24 + 24,84	5,84 + 0,46	1,45 + 0,1	64,5 + 4,08	0,99 + 0,07
Trayecto VII	5,49 + 0,26	265,65 + 15,22	3,83 + 0,18	0,92 + 0,03	41,73 + 2,3	0,64 + 0,02
Promedio (C_h)	8,69 + 0,61	366,5 + 23,8	5,17 + 0,35	1,46 + 0,09	61,21 + 3,9	0,87 + 0,05
Promedio p/km	1,72 + 0,12	72,57 + 4,71	1,02 + 0,07	0,29 + 0,02	12,12 + 0,77	0,17 + 0,01

cti = Costes sociales por congestión, por mayores tiempos de viaje; *cfi* = Idem, por mayores costes de funcionamiento por kilómetro; *ctp* y *cfp*, valores paralelos, correspondientes a un pasajero adicional del TP. (Pesetas de 1984.)

mos con aquellos en los que se observaba una cierta reducción transitoria de la intensidad en pleno período de horas punta. La determinación se ha llevado a cabo mediante la aplicación de un algoritmo a los diferentes trayectos de la muestra[8], con la obtención de los siguientes valores medios como intervalo de confianza:

	% de pasajeros/viaje en cada bloque horario		
	Estimación inferior	(y_h)	Estimación superior
1. En período punta sin retenciones	29,85		27,96
2. En períodos punta con retenciones	5,05		6,94
3. En períodos valle diurnos	55,75		55,75
4. En períodos valle nocturnos	9,35		9,35

lo que significa estimar que el tráfico se desarrolla en situación de punta-con-retenciones, entre cuarenta y cincuenta y cinco minutos al día como promedio para los diferentes tramos.

[8] El algoritmo se basa en las siguientes variables para cada tramo:

x = % de tráfico por hora, promedio para el conjunto de horas punta.
y = % de tráfico por hora, para la hora punta flotante (máxima).
z = % de tráfico por hora, equivalente al porcentaje del cuarto de hora con punta máxima (es decir, cuatro veces éste).

En base a estas variables, el algoritmo debería dar lugar a una aproximación a la fracción del tráfico en horas punta que se realiza en situación de punta-con-retención. Para ello se trataba de que cumpliese las condiciones de que, en un caso extremo de que todo el intervalo de horas punta correspondiesen a un tráfico con retención, el algoritmo debería dar un valor próximo a la unidad; y próximo a cero en el caso extremo contrario de que en el tramo en cuestión el tráfico en horas punta se desarrolle sin retenciones (tramo ascendente, hacia la derecha, de la figura 1b). Fijadas estas condiciones, mediante un proceso iterativo y sucesivos tests de verosimilitud, se llegó a la determinación del siguiente algoritmo:

$$f = \frac{(x - 5{,}66)}{(9 - 5{,}66} \cdot \frac{(y - x)}{(y - 6{,}4)} \cdot \frac{y}{z}$$

siendo 5,66 = límite inferior del porcentaje promedio por hora punta, resultante de suponer que el tráfico de las dieciséis horas diurnas, 90,56 por 100 en promedio, se distribuye de una manera uniforme (90,56/16). El valor 9 = valor máximo del promedio x en la muestra. Y 6,4 = porcentaje de tráfico por hora, a partir del cual habían sido calificadas las horas de un tramo, como horas punta.

Aplicado este algoritmo a los 25 tramos de la muestra de trayectos, la media resultante fue de 0,1988. Aplicado este coeficiente sobre el porcentaje de tráfico que se desarrollaba en promedio en horas-punta (34,9 por 100), resultó un 6,94 por 100 como el tráfico que tiene lugar, en promedio, en situación de punta-con-retención.

Esto corresponde a la estimación que hemos denominado límite superior del intervalo. El límite inferior corresponde a una estimación subjetiva consistente en suponer que, en promedio, el tráfico se desarrolla bajo condiciones de congestión-con-retención durante cuarenta minutos al día: veinte minutos alrededor del cuarto de hora de máxima punta, y otros veinte ubicados en la punta relativa del medio día o de la tarde (según los tramos).

Ponderando los costes por congestión anteriormente relacionados para cada uno de los tres bloques horarios diurnos, con los porcentajes anteriores, obtenemos como *promedios de costes sociales por congestión, por pasajero adicional*, válidos para un día laborable y para un trayecto-tipo (que como puede comprobarse a partir de la muestra, resulta de 5,05 km) los siguientes valores (en pesetas de 1984):

	Para el TI		Para el TP (autobuses)		Diferencia	
	est. inf.	sup.	est. inf.	sup.	est. inf.	sup.
$\Sigma C_h \cdot y_h = 80{,}65$	25,56	32,76	3,62	5,47	21,94	27,29

Es decir, que, según lo anterior, el coste social por congestión que origina un pasajero al optar por desplazarse en vehículo individual en lugar de utilizar el transporte público de superficie, resulta en promedio (para el área urbana de Barcelona) y para un día laborable, entre 21,9 y 27,3 ptas. (y entre 25,56 y 32,76 ptas., si la comparación se hace respecto al transporte público subterráneo, ya que éste ocasiona un efecto nulo sobre la densidad del tráfico en superficie). Magnitudes que —tomando los valores inferiores del intervalo—, en términos relativos, equivalen (en 1984) al 45 por 100 del coste medio del servicio, para el caso del TP por autobuses; y al 61 por 100 en el caso del TP «Metro». A título comparativo, las tarifas medias de «Transportes Municipales de Barcelona» —únicas y uniformes en cada uno de los dos medios del TP— del año en estudio, cubrían el 57 y 53 por 100 de los costes medios del servicio, respectivamente; es decir, que la subvención efectiva era del 43 y 47 por 100, respectivamente. Y de acuerdo con los resultados obtenidos en la sección 4, y si se aceptase como criterio de optimalidad *second best* el segundo mencionado en la sección 1, la subvención total para este caso debería ser del 45 y del 61 por 100 de los costes totales, respectivamente.

Alternativamente, si se toma como criterio *second best* el primero citado en la sección 1 (que es el que podríamos llamar el criterio ortodoxo), sería necesario disponer además de mediciones sobre la elasticidad cruzada tarifas del TP/pasajeros del TI. Mediciones de las que no disponemos en nuestro caso. No obstante, y a título comparativo, Else (1985, pág. 277), siguiendo este criterio, efectúa una estimación de un «subsidio óptimo» de alrededor del 60 por 100 sobre costes, para el servicio de autobuses, basándose en mediciones de variables indirectas referidas a áreas urbanas de Gran Bretaña.

Ahora bien, es evidente que hay que tener en cuenta que la determinación de la tarifa óptima (y por tanto de la subvención óptima) justificada en base a los menores costes sociales de un servicio de TP, debería tener en cuenta otra serie de elementos relevantes: por una parte, que los costes sociales no se limitan a los de congestión. Y por otra parte, cuáles serán los efectos concretos del subsidio en la realidad; tanto por lo que respecta al tipo de comportamiento que pueda

inducir en la empresa subvencionada (según las características de ésta —pública o privada— y según la forma de establecer el subsidio (Frankena, 1981)), como por la necesidad de tener en cuenta no sólo los aspectos de eficiencia asignativa, sino también los aspectos redistributivos y fiscales (reparto de la financiación entre Administración local y Administración central) que necesariamente comportan las subvenciones al servicio de transportes (Frankena, 1983; Dodgson/Topham, 1987).

En cualquier caso, hay que señalar que los resultados aquí expuestos no pretenden ir más allá de medir la diferencia entre el coste social por pasajero TI/TP en el margen (dada la situación del tráfico existente); y que, además, constituyen una primera aproximación, realizada en base a la información disponible a lo largo de la realización de la investigación aquí resumida. En este sentido, es evidente que si se dispusiese de unos estudios que aportasen una información más precisa de los flujos de tráfico para intervalos inferiores a un cuarto de hora, así como registros simultáneos más sistemáticos de velocidades medias, ello permitiría obtener unas estimaciones más fiables tanto de los parámetros como de las funciones velocidad/densidad utilizadas; lo que haría posible obtener unos resultados con un grado de confianza más elevado. En este sentido hay que destacar, por ejemplo, que los resultados obtenidos son altamente sensibles a la variable «proporción del tráfico que se desarrolla bajo condiciones de períodos punta-con-retenciones», lo que permite señalar que ésta debería ser la primera de las cuestiones que deberían ser objeto de una medición más directa, precisa y matizada que la que nos ha permitido la información disponible para la presente investigación.

Referencias

Bertrand, T. J. (1978): «Congestion Cost in a Transport System; with an application to Bangkok», *Journal of Transport Economics and Policy,* septiembre de 1978, págs. 244-279.

Dodgson, J. S., y Topham, N. (1987): «Benefit-Cost Rules for Urban Transit Subsidies; an Integration of Allocational, Distributional and Public Finance Issues», *Journal of Transport Economics and Policy,* vol. XXI, *núm. 1,* págs. 57-71.

Else, P. K. (1981): «A reformulation of the theory of optimal congestion taxes», *Journal of Transport Economics and Policy,* vol. XV, *núm. 3,* págs. 217-232.

Else, P. K. (1985): «Optimal Pricing and Subsidies for Scheduled Transport Services», *Journal of Transport Economics and Policy,* vol. XIX, *núm. 3,* págs. 263-279.

Frankena, M. W. (1981): «The effects of Alternative Urban Transit Subsidy Formulas», *Journal of Public Economics,* vol. 15, págs. 337-348.

Frankena, M. W. (1983): «The efficiency of Public Transport Objectives and Subsidy Formulas», *Journal of Transport Economics and Policy,* vol. 17, págs. 67-76.

Glaister, S., y Lewis, D. (1978): «An integrated fares policy for transport in London», *Journal of Public Economics, núm. 9,* págs. 341-355.

Jackson, R. (1975): «Optimal Subsidies for Public Transit», *Journal of Transport Economics and Policy,* enero de 1975, págs. 3-15.

Turvey, R., y Mohring, H. (1975): «Optimal Bus Fares», *Journal of Transport Economics and Policy, núm. 9,* págs. 280-286.

Walters, A. A. (1961): «The Theory and Measurement of Private and Social Cost of Highway Congestion», *Econometrica,* vol. 29, págs. 676-699.

Abstract

The present paper deals with one of the basic issues for determining the optimal fares and subsidies for Urban Public Transport services: Concretely, the quantification of the differential between the congestion's social cost generated by an additional passenger of the Private Transport, and that generated by an additional passenger of the Public Transport, given a concrete traffic situation. To do this, a general calculation model is developed and them precised and applied to Barcelona's urban traffic data. Finally the results obtained are discussed as for their use in calculating the justified percentage of Subsidy over Costs, and as for their degree of confidence.

Recepción del original, junio de 1988.
Versión final, septiembre de 1988.