

## Proyección de Tráficos Mediante un Modelo Microeconómico

Ing. Germán E. Valverde González, M.B.A., M.Sc.  
Director del Departamento de Ingeniería de Transporte  
Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica  
[german.valverde@ucr.ac.cr](mailto:german.valverde@ucr.ac.cr)

### Resumen

Se propone un nuevo método para proyectar los flujos vehiculares en una red vial, el cual consiste en un modelo que relaciona el crecimiento del tráfico con el crecimiento de variables socioeconómicas. El método puede ser utilizado para estimar los flujos de tráfico futuro de una carretera aún cuando esta no posea una serie histórica de su tránsito promedio diario (TPD), ya que considera que existe un efecto global de largo plazo del sistema de actividades sobre la demanda de transporte, que afecta por igual el tráfico de todas las vías dentro del área de estudio. El proceso de calibración del modelo utiliza las técnicas de análisis de series de datos tipo panel. La aplicación de la metodología al caso particular de la red vial del centro de la ciudad de San José muestra un buen ajuste de los datos al modelo postulado.

**Palabras clave:** PROYECCIÓN DE TRÁFICO, TRÁNSITO PROMEDIO DIARIO, DEMANDA DE TRANSPORTE, SERIES HISTÓRICAS DE TRÁNSITO, DATOS PANEL.

### 1. Introducción

La demanda de transporte es derivada de la demanda de bienes y servicios. Así, la cantidad de viajes que se producen hacia y desde una ciudad, durante un período determinado, está relacionada con el tipo, cantidad y distribución espacial y temporal de las actividades sociales y económicas de la ciudad y sus alrededores, así como de las características económicas y demográficas de la sociedad en estudio.

Es así como para proyectar a futuro los flujos vehiculares en el área de estudio, se relacionó el comportamiento histórico del flujo vehicular de las principales vías de acceso a una ciudad, en particular a San José, con tres variables socio-económicas, a saber, la población, el producto interno bruto y la flota vehicular.

El análisis efectuado para la proyección de tráfico tomó en consideración que los flujos vehiculares dentro de la ciudad, ya sean viajes que se dirigen hacia la ciudad o que se producen en la ciudad y se dirigen a algún destino fuera de ella, en su gran mayoría utilizan alguna de las vías principales de acceso, que en el caso de San José son: la ruta 1, la ruta 2, la ruta 27 y la ruta 32. Por lo tanto, para estimar el crecimiento del tráfico en la ciudad se utilizó el comportamiento generalizado de crecimiento del tráfico de estas vías de acceso.

## **2. El modelo**

### **2.1 Relación entre el TPD y la flota vehicular**

Debido a que el crecimiento del tráfico está directamente relacionado con el del parque automotor, se pueden realizar previsiones del primero basándose en la evolución futura del segundo (Kraemer et al, 2003).

Los datos que se utilizaron en este estudio para analizar la tendencia del tráfico vehicular y su relación con la flota vehicular presenta dos dimensiones: 1) una serie de tiempo en cada una de las estaciones de TPD, así como en el registro de los datos de la flota, y 2) una dimensión estructural, más conocida como corte transversal, la cual constituye información para todas las unidades de estudio (las estaciones de conteo de TPD) en un momento determinado (un año específico), y que está asociada con un valor específico de la variable flota vehicular. Las bases de datos que poseen estas características se conocen con el nombre de datos panel.

Por lo tanto, para estudiar la relación que existe entre la tendencia de crecimiento del tráfico en las estaciones de TPD y la tendencia de crecimiento de la flota vehicular del país se utilizó la técnica econométrica de datos panel. El principal objetivo de aplicar y estudiar los datos panel es capturar la heterogeneidad no observable, en este caso, entre las distintas estaciones de TPD, así como en el tiempo, dado que esta heterogeneidad no se puede detectar ni con estudios de series temporales ni tampoco con los de corte

transversal<sup>1</sup>. La aplicación de esta metodología, muy usada en estudios de naturaleza microeconómica, permite analizar dos aspectos de suma importancia cuando se trabaja con este tipo de información y que forma parte de la heterogeneidad no observable: i) los elementos individuales específicos y ii) los efectos temporales.

Los efectos individuales específicos, en nuestro caso, son aquellos que afectan de manera desigual el TPD de cada una de las estaciones de conteo, los cuales se consideran invariables en el tiempo y que están relacionados con condiciones locales, tales como la capacidad de la vía y los efectos de distribución de viajes en la red (que a nivel global en nuestro estudio se consideran fijos en el tiempo).

Los efectos temporales son aquellos que afectan por igual a todas las unidades individuales del estudio, es decir, el impacto que tiene el comportamiento socio-económico sobre el crecimiento global de la demanda agregada de transporte. Este efecto temporal es el que más nos interesa, ya que nos permite estimar las tasas futuras del crecimiento del tránsito como respuesta al crecimiento de las variables socioeconómicas.

Con el propósito de proyectar las tasas de crecimiento del tránsito sobre la base del comportamiento de la flota vehicular del país, se postula el siguiente modelo econométrico:

$$T_{it} = k_i \cdot F_{it}^{\beta} \quad (1)$$

Donde:

$T_{it}$  : TPD de la estación “ $i$ ” en el año “ $t$ ”.

$F_{it}$  : Flota automotor del país en el año “ $t$ ”. Se emplea el subíndice “ $i$ ” para asociar el dato de la flota a cada estación “ $i$ ”.

$k_i$  y  $\beta$ : Parámetros del modelo a ser determinados.

---

<sup>1</sup> Véase Mayorga y Muñoz (2000)

En el modelo de la Ecuación (1) el parámetro  $k_i$  representa los efectos individuales específicos de cada estación “ $i$ ”. Por su parte, el parámetro  $\beta$ , que corresponde a la elasticidad del TPD con respecto a la flota, modela los efectos temporales que afectan por igual el crecimiento del tránsito en todas las estaciones.

La elasticidad del TPD con respecto a la flota,  $\beta$ , es la razón entre el crecimiento porcentual del TPD y el crecimiento porcentual de la flota:

$$E_{T/F} = \frac{\partial T/T}{\partial F/F} = \beta \quad (2)$$

De esta forma, la tasa de crecimiento generalizado del tráfico se determina multiplicando  $\beta$  por la tasa de crecimiento de la flota vehicular.

## 2.2 Modelo econométrico del índice de motorización

De acuerdo con el modelo (1) que se postula en la sección 2.1, el problema de estimar la tasa de crecimiento generalizado del tráfico queda trasferido al de proyectar la flota de vehículos.

La flota vehicular se puede estimar como el producto del número de habitantes y el índice de motorización (vehículos por habitante). En general, el índice de motorización tiende a crecer con el paso del tiempo, y su tasa de crecimiento suele ser mayor en zonas en las que el índice inicial es reducido, y va disminuyendo cuando el índice aumenta, siguiendo el comportamiento típico de una curva logística. Además, existe una correlación entre el índice de motorización y el crecimiento económico del país, ya que un mayor poder adquisitivo se refleja en una mayor posesión de bienes (como el automóvil).

Teniendo en cuenta las relaciones y comportamientos señalados, se suele postular una relación del tipo logístico entre el índice de motorización y algún indicador que

represente el nivel económico del país o región analizada (Ver Kraemer et all, 2003). Para efectos de este estudio se postula el siguiente modelo econométrico:

$$f_t = \frac{F}{1 + e^{\lambda + \varphi P_t}} \quad (3)$$

Donde:

$f_t$  : Índice de motorización del año  $t$ , vehículos/1000 habitantes.

$F$  : Máximo valor de  $f$ .

$P_t$  : Producto interno bruto per cápita (PIB/cápita) en el año  $t$ .

$\lambda, \varphi$  : Parámetros del modelo.

### 3. Calibración del modelo

#### 3.1 El modelo de datos panel

Si a la Ecuación 1 aplicamos una transformación logarítmica obtenemos:

$$\ln(T_{it}) = \ln(k_i) + \beta \cdot \ln(F_{it}) \quad (4)$$

Realizando los siguientes cambios de variable:

$$Y_{it} = \ln(T_{it}) \quad (5)$$

$$\alpha_i = \ln(k_i) \quad (6)$$

$$X_{it} = \ln(F_{it}) \quad (7)$$

El modelo adquiere la siguiente forma:

$$Y_{it} = \alpha_i + \beta \cdot X_{it} + u_{it} \quad (8)$$

que corresponde a la forma básica de un modelo de datos panel con efectos fijos, en el cual  $u_{it}$  corresponde al término aleatorio de un modelo estocástico, cuyo valor esperado es cero.

Existen dos métodos para calibrar el modelo de la Ecuación (8), el primero consiste en expresar el modelo con el uso de “ $n-1$  regresores binarios”, mientras que el segundo consiste en expresar el modelo en la forma de “desviaciones con respecto a la media”. En ambos casos, la estimación del modelo se realiza aplicando el método estadístico de mínimos cuadrados ordinarios (MCO).

### i) Modelo de efectos fijos con $n-1$ regresores binarios

El modelo de “efectos fijos” con  $n-1$  regresores binarios tiene la siguiente forma:

$$Y_{it} = \alpha_i + \beta \cdot X_{it} + \sum_{j=1}^{n-1} \gamma_j \cdot Z_{ji} + u_{it} \quad (9)$$

Donde:

$n$  : cantidad de estaciones de TPD

$Z_{ji}$  : regresores binarios

$\gamma_j$  : parámetros del modelo a ser determinados

Y en el que los regresores binarios,  $Z_{ji}$ , se definen como:

$$Z_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{si } j = i \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (10)$$

### ii) Modelo de efectos fijos en desviaciones con respecto a la media

En el modelo de la Ecuación (9) la media de las unidades individuales satisface:

$$\frac{1}{T_i} \sum_{t=1}^{T_i} Y_{it} = \alpha_i + \beta \frac{1}{T_i} \sum_{t=1}^{T_i} X_{it} + \frac{1}{T_i} \sum_{t=1}^{T_i} u_{it} \quad (11)$$

Donde  $T_i$  es el total de años para los que existen datos en la estación “i”.

La desviación con respecto a la media de las unidades individuales es:

$$Y_{it} - \frac{1}{T_i} \sum_{t=1}^{T_i} Y_{it} = \beta \left( X_{it} - \frac{1}{T_i} \sum_{t=1}^{T_i} X_{it} \right) + \left( u_i - \frac{1}{T_i} \sum_{t=1}^{T_i} u_{it} \right) \quad (12)$$

La Ecuación (12) es el modelo de datos panel de efectos fijos expresado en desviaciones con respecto a la media, el cual se puede escribir de forma más simplificada realizando los siguientes cambios de variable:

$$\tilde{Y}_{it} = Y_{it} - \frac{1}{T_i} \sum_{t=1}^{T_i} Y_{it} \quad (13)$$

$$\tilde{X}_{it} = X_{it} - \frac{1}{T_i} \sum_{t=1}^{T_i} X_{it} \quad (14)$$

$$\tilde{u}_i = u_i - \frac{1}{T_i} \sum_{t=1}^{T_i} u_{it} \quad (15)$$

De tal manera que el modelo de la Ecuación (12) se puede re-escribir como:

$$\tilde{Y}_{it} = \beta \cdot \tilde{X}_{it} + \tilde{u}_i \quad (16)$$

Nótese que en este caso los efectos individuales específicos de cada estación de tránsito no son identificables y no se pueden determinar al aplicar el método MCO al modelo en desviaciones con respecto a la media. Sin embargo, tal y como se indica en la sección 2.1, lo que interesa para estimar la tasa de crecimiento generalizado del tránsito es determinar la elasticidad del tránsito con respecto a la flota vehicular, es decir, el parámetro  $\beta$ .

### 3.2 Calibración del sub-modelo de la tasa de motorización

El modelo de la Ecuación (3) puede reescribirse como:

$$e^{\lambda + \varphi P_t} = \frac{F}{f_t} - 1 \quad (17)$$

Al aplicar logaritmo natural a ambos lados se obtiene:

$$\lambda + \varphi P_t = \text{Ln} \left( \frac{F}{f_t} - 1 \right) \quad (18)$$

Esta ecuación se puede escribir de forma más simplificada realizando los siguientes cambios de variable:

$$Y = \text{Ln} \left( \frac{F}{f_t} - 1 \right) \quad (19)$$

$$X = P_t \quad (20)$$

Así:

$$Y = \lambda + \varphi X \quad (21)$$

La ecuación (21) puede calibrarse mediante el método MCO.

El valor del índice máximo de motorización,  $F$ , está relacionado con el nivel de riqueza del país, y de acuerdo con Kraemer et al, 2003, límites que parecían altos hace unos años se han sobrepasado después, y aunque este índice siga creciendo puede pensarse que será siempre inferior a un coche por habitante. Para el caso de países con un gran nivel de desarrollo y altos índices de motorización, el valor de  $F$  es cercano o incluso mayor a 700 vehículos/1000 hab.

Tanner (1974) propone un método para estimar  $F$  que consiste en ajustar mediante una regresión lineal el comportamiento entre la tasa de crecimiento anual de la flota automotor,  $g_t$ , y el valor de la flota,  $f_t$ :

$$g_t = a + b \cdot f_t \quad (22)$$

El índice máximo de motorización,  $F$ , corresponde por definición al valor máximo de  $f_t$  que se alcanza en el momento cuando la tasa de cambio del índice de motorización ( $g_t$ ) es cero. De esta forma,  $F = -a/b$ , y se espera que  $a$  sea positivo y  $b$  sea menor que cero, de donde  $F > 0$ .

Aplicando este método, Tanner (1974) estimó el valor de  $F$  en 450 veh/1000 hab para Gran Bretaña.

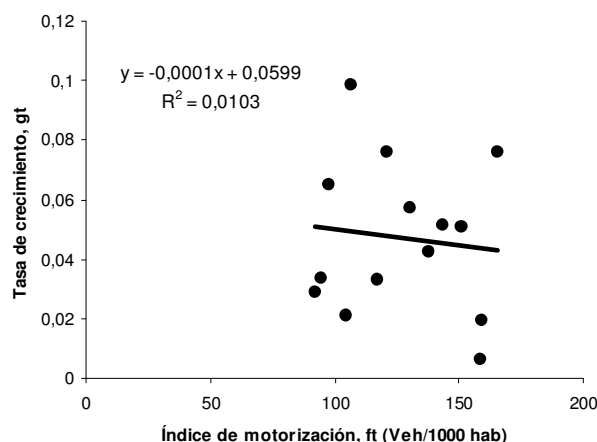


Figura 1: Determinación del índice máximo de motorización,  $F$ , Método de Tanner

La

Figura 1 resume los resultados obtenidos al aplicar el método Tanner para estimar  $F$  utilizando la serie de datos de la flota automotor y los datos de población entre 1987 y el 2005. El valor que se obtiene del índice máximo de motorización es  $F = 592$  veh/1000 hab. Sin embargo, el resultado obtenido mediante el método de Tanner no es muy confiable para el caso de Costa Rica, debido a la gran dispersión de los datos que se observa en el gráfico de la Figura 1, y que también se refleja en el bajo valor del coeficiente de determinación,  $R^2$ .

Por lo tanto, para estimar  $F$  se realizó un proceso de iteración, mediante el cual se determinó el valor de  $F$  que maximiza el coeficiente de determinación,  $R^2$ , correspondiente al ajuste del modelo econométrico (3). De esta forma, el índice máximo

de determinación estimado, corresponde a aquel valor que permite encontrar el modelo econométrico entre  $f_i$  y  $P_i$  del tipo logístico propuesto, que mejor se ajusta a los datos.

#### 4. Caso de Estudio

El análisis de tendencias del tráfico de las vías de acceso a San José se efectuó relacionando las series históricas del Tránsito Promedio Diario (TPD) de las estaciones de conteo del Departamento de Planificación Sectorial del Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT), con la serie temporal de la flota de vehículos inscritos en el país. El Cuadro 1 indica las estaciones de registro de TPD del MOPT localizadas sobre las principales rutas de acceso a San José, y que se encuentran más cercanas a la ciudad.

**Cuadro 1:** Estaciones de TPD, vías de acceso a San José

| Ruta | Estación | Descripción   |
|------|----------|---|
| 1    | 101      | Sabana-Hospital México, puente sobre el Río Torres                          |
| 2    | 1        | San Pedro-Curridabat, puente sobre el Río Piruses (Montesacro)              |
|      | 3        | San José-San Pedro, Los Yoses (Frente al Bar Río)                           |
| 27   | 11       | San José-Sabana Oeste- Santa Ana, Peaje de Escazú                           |
|      | 736      | Sabana Oeste-Sn Rafael de Escazú, puente sobre el Río Tiribí                |
|      | 739      | San José-San Rafael de Escazú, al costado sur del Gimnasio Nacional         |
| 32   | 14       | San Juan de Tibás-Zurquí, Santa Elena de San Isidro                         |
|      | 173      | San José-Tibás, 100 m después del paso elevado de la Ruta N° 101 a Llorente |

Para calibrar el modelo econométrico (8) se aplicó el método MCO, al modelo de datos panel de efectos fijos con n-1 regresores binarios (Ver Ecuación 9). Los resultados se resumen en el Cuadro 2.

**Cuadro 2:** Resultados de la calibración del modelo econométrico de datos panel

| Ruta | Estación, j | $k_j$  |
|------|-------------|--------|
| 1    | 101         | 1,3023 |
| 2    | 1           | 0,6598 |
|      | 3           | 0,8013 |
| 27   | 11          | 0,2968 |

|                  |         |        |
|------------------|---------|--------|
|                  | 736     | 0,7295 |
|                  | 739     | 0,6290 |
| 32               | 14      | 0,1284 |
|                  | 173     | 0,3590 |
| <b>Parámetro</b> |         |        |
|                  | $\beta$ |        |
|                  | $R^2$   |        |

Para verificar el valor estimado de la elasticidad del tráfico con respecto a la flota,  $\beta$ , se aplicó el método MCO al modelo de datos panel en desviaciones con respecto a la media, obteniéndose, como era de esperar, el mismo valor para  $\beta$  que se muestra en el Cuadro 2 (en este caso el  $R^2$  obtenido fue de un 64%).

La Figura 2 muestra gráficamente los resultados obtenidos en el análisis iterativo que se realizó para estimar el valor de  $F$ . Mediante este análisis se estimó un valor máximo de 425 veh/1000 hab para Costa Rica. Debe tenerse en consideración que el valor encontrado del parámetro  $F$  tiene validez para proyecciones de corto a mediano plazo, ya que en la práctica el valor de  $F$  tiende a incrementarse en largo plazo (Ver Kraemer et al, 2003 y Ortúzar y Willumsen, 2001).

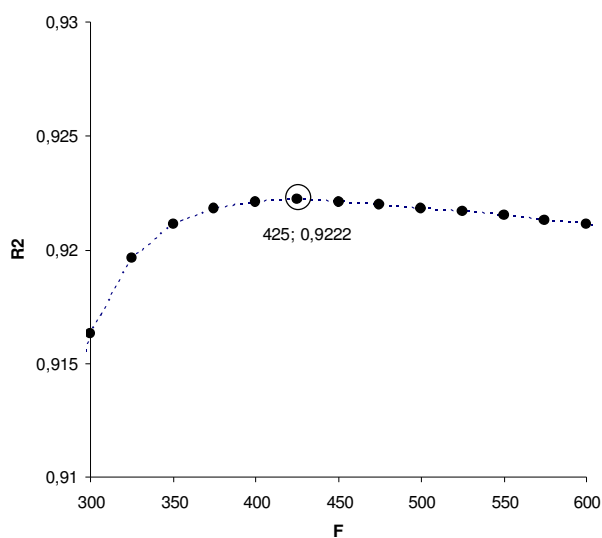


Figura 2: Determinación de  $F$  mediante proceso iterativo.

Utilizando el valor estimado de  $F$  y la series temporales de flota automotor, producto interno bruto, población, y aplicando las transformaciones de variable indicadas en las ecuaciones (19) y (20), se aplica el método MCO entre  $Y$  y  $X$  para calibrar el modelo econométrico (3). En la Figura 3 se muestra de forma gráfica el ajuste del modelo a los datos reales, y se indican los valores encontrados de los parámetros del modelo. Este modelo econométrico permite explicar un 92% de la relación entre el PIB per cápita y el índice de motorización.

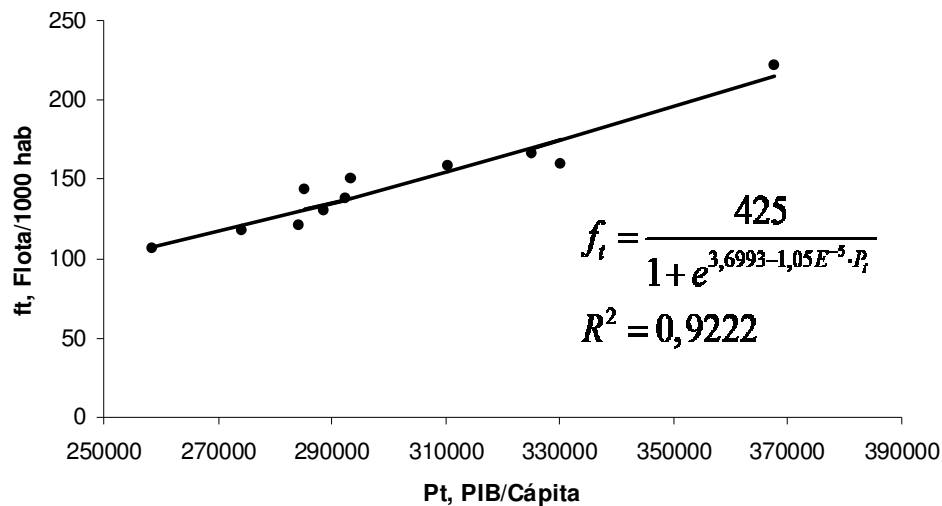


Figura 3: Calibración del modelo econométrico para estimar el índice de motorización,  $f_t$  vs  $P_t$

## 5. Conclusiones

La gran mayoría de estudios técnicos de transporte e ingeniería de tránsito en Costa Rica no utilizan modelos para la proyección de demanda de transporte, sino que hacen uso de series longitudinales de tiempo de los datos de tránsito promedio diario (TPD) de las carreteras, y utilizan la tasa histórica de crecimiento vehicular para estimar los flujos vehiculares futuros.

Esta técnica es válida únicamente para proyectar tráfico a corto plazo, ya que la tasa histórica de crecimiento anual del tráfico no se mantiene en largo plazo, debido principalmente por la limitación de capacidad de las carreteras. Para tomar en consideración que el tránsito a futuro crece a una tasa inferior que la del registro histórico, se debe recurrir al criterio profesional, y de forma subjetiva decidir el valor de la tasa de crecimiento que se aplicará para la proyección de los flujos de tránsito, de lo contrario se opta por sobreestimar la demanda de viajes y asumir las implicaciones económicas indeseables que se obtienen del sobre diseño de las soluciones viales.

Por estas razones se concluye que, el modelo microeconómico propuesto para la proyección de tráfico es una valiosa herramienta alternativa al uso de tendencias de

crecimiento históricas de TPD, la cual no adolece de las limitaciones técnicas comentadas en los párrafos anteriores.

Los resultados obtenidos de la aplicación a la ciudad de San José demuestran que, el comportamiento y relación entre las variables se ajustan a la forma funcional postulada para el modelo. El modelo postulado logra explicar más de un 80% del comportamiento histórico de las series de TPD, del cual un 64% logra ser explicado por el parámetro  $\beta$ .

Dada la forma funcional del modelo de predicción de tránsito, conformado por una componente longitudinal constante ( $\beta$ , que explica el comportamiento a lo largo del tiempo) y una componente transversar que explica las diferencias del TPD entre cada sitio ( $k_i$ ), es posible utilizar modelo para proyectar el TPD de una vía localizada dentro del área de estudio que no posea un registro histórico de TPD, ya que la elasticidad del TPD con respecto al crecimiento de la flota vehicular ( $\beta$ ) es válido para cualquier vía localizada dentro del área de análisis. Para estos efectos, basta con poseer una medición reciente del tránsito de la vía de interés y estimar mediante el submodelo (3) el crecimiento de la flota vehicular al año en que se desea hacer la proyección del tránsito.

Por su parte, se concluye que el modelo de la tasas de motorización logra explicar adecuadamente la relación que existe entre el crecimiento de la población, la condición económica nacional y la flota automotor. Por lo tanto, este modelo permite estimar el crecimiento de la flota vehicular con un buen nivel de confianza.

Se concluye también que para el caso de Costa Rica, el método propuesto por Tanner (1974) no permite estimar con suficiente confianza el valor de la tasa máxima de motorización (F), y resulta más confiable utilizar un valor F estimado según el método explicado en este artículo.

## **Bibliografía**

Kraemer, C., Pardillo, J. M., Roccoci, S., Romana, M. G., Blanco, V. S., Del Val, M. A. (2003) Ingeniería de Carreteras, Volumen I. MacGraw-Hill/Interamericana de España, España.

Mayorga M. y E. Muñoz (2000) La técnica de datos de panel una guía para su uso e interpretación. Banco central de Costa Rica. Departamento de investigaciones económicas.

Maddala, G.S. (1994) Econometría. MacGraw-Hill/Interamericana de México, S.A. de C.V., México.

Ortúzar, J. de D., and L.G. Willumsen (2001) Modelling Transport: Third Edition. John Wiley and Sons, Chichester.

Tanner, J.C. (1974) Forecasts of vehicles and traffic in Great Britain: 1974 revisión. TRRL Report LR650, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.