

## **TRAMOS. Diseño de una herramienta para la planificación del tráfico y el transporte**

**Jesús Racero Moreno, Ricardo Galán de Vega, Marcos Calle Suárez, Fernando Jiménez Canelada**

Departamento de Organización, Universidad de Sevilla, España. [jrm@esi.us.es](mailto:jrm@esi.us.es), [rgalandevega@esi.us.es](mailto:rgalandevega@esi.us.es)  
[mcs@esi.us.es](mailto:mcs@esi.us.es), [canelada@esi.us.es](mailto:canelada@esi.us.es)

### **Resumen**

*TRAMOS (Traffic and TRansport Analysis, Modelling and Optimization System) es una herramienta para la planificación y el estudio de problemas de tráfico y transporte en el ámbito urbano y metropolitano. Comparte algunas funcionalidades con otros paquetes comerciales como Emme2, TRIPS, Transcad en el campo de la planificación del transporte y TRAF-NETSIM, AIMSUM2, SIMTRAFFIC en el campo de la simulación o SYNCRHO, CORSIM, CONTRAM en el campo de la regulación de señales semafóricas.*

*A diferencia de las anteriores, TRAMOS constituye un primer intento por aunar, a partir de las redes que sirven de base al estudio del tráfico, las diferentes aplicaciones necesarias para el análisis de problemas tan diferentes como la construcción de una nueva arteria, la inclusión de un nuevo modo de transporte o el cálculo de un plan de control de tráfico para un evento determinado.*

*TRAMOS incorpora diferentes algoritmos, de acuerdo a los estándares admitidos en el mundo del transporte como mejores prácticas.*

*En la actualidad se encuentra disponible en su versión 1.0. Es el resultado del esfuerzo realizado durante los últimos años por miembros del grupo de Tecnologías de la Información e Ingeniería de Organización de la Escuela de ingenieros de la Universidad de Sevilla. Está siendo desarrollado por ISOIN en colaboración con FIDETIA (Fundación para la Investigación y el Desarrollo de las Tecnologías de la Información – Universidad de Sevilla), FFII (Fundación para el Fomento de la Innovación Industrial – UPM) y el CSETI (Centro Chino Español de Transporte Inteligente).*

**Palabras clave:** TRAMOS, Planificación del transporte, Asignación de tráfico

### **1. Introducción**

La mayoría de la actividad desarrollada en las áreas urbanas está asociada al desplazamiento de personas y mercancías entre diferentes zonas de las ciudades y sus coronas metropolitanas, haciendo uso del viario y las infraestructuras disponibles. Un sistema de transporte eficiente es esencial para la salud económica y la calidad de vida en las regiones urbanas y su entorno. Cuando se analiza la infraestructura presente, así como futuras inversiones y políticas operacionales, los estudios de planificación del sistema de transporte adquieren una importancia estratégica.

La mayor parte del incremento de la demanda de movilidad en los últimos años es debida al incremento en el transporte privado, a causa del desarrollo urbano y el crecimiento de los niveles de vida. El incremento de la movilidad presenta, sin embargo, serios problemas en las regiones urbanas/metropolitanas, tales como contaminación, incremento de las tasas de incidentes, efectos sociales sobre la vida urbana debido a la expansión de autopistas y un uso

poco eficiente de la oferta de transporte a causa de la alta congestión.

En los estudios de planificación urbana se evalúan las modificaciones y ampliaciones del sistema de transporte existente con el objetivo de aliviar los problemas mencionados anteriormente, considerando la utilización de un amplio rango de modos de transportes.

El proceso de planificación del tráfico urbano ha sido un proceso evolutivo. En la actualidad se emplean los métodos de previsión de la población futura y su distribución, análisis de generación de viajes en relación con las características de las zonas y una planificación sobre un viario lo mas completo posible

Dependiendo del propósito del estudio de transporte, los modelos pueden relacionarse con diferentes componentes del sistema de transporte (utilización del suelo, política de control, generación y distribución de viajes), diferentes niveles de agregación de la realidad (modelos macroscópicos o microscópicos), diferentes horizonte de planificación (desde el empleo del modelo en tiempo real hasta las previsiones realizadas con vistas a 20 años), y diferentes principios de modelados (modelos estadísticos, modelos de optimización y modelos de simulación).

### **1.1. El proceso de planificación del transporte**

La base del modelado de problemas de transporte consiste en la aceptación de un conjunto de postulados. Entre ellos cabe citar: (1) Los patrones de viajes son tangibles, estables y predecible y (2) la demanda de transporte es directamente proporcional a la distribución y densidad de utilización del suelo, que pueden ser estudiadas y determinadas con gran precisión para uso futuro.

Domencich y McFadden (1975) establecieron un conjunto de requisitos en relación a la demanda, que deben ser satisfechos por los modelos de planificación que pretendan ser útiles como herramientas de toma de decisiones. Deberá ser sensible a la política de transporte, de forma que pueda predecir los cambios de política; deber ser causal, estableciendo una unión entre los atributos definidos en el sistema de transportes y las decisiones individuales; debe ser flexible, permitiendo su utilización en una gran variedad de problemas de planificación sin aumento de coste en cuanto a recogida de datos y calibración del modelo; transferible, permitir que el modelo puede ser transferido de un área a otro sin volver a estimar los parámetros y finalmente debe ser eficiente, en términos de ofrecer resultados exactos dependiendo del coste imputado.

El procedimiento tradicional de acometer un proceso de planificación de transporte es identificar los diferentes modelos del sistema, que son analizados por separado, y con más frecuencia de forma secuencial. Este proceso de planificación puede ser dividido en los siguientes pasos:

**1. Definición y Organización de Objetivos.** La primera etapa consiste en obtener los recursos monetarios necesarios, así como en establecer la participación y organización del grupo de trabajo, estableciendo la estructura del comité y contratando y fijando las funciones del personal. En esta etapa se establecen los objetivos del estudio.

**2. Establecer un año base para la recogida de información.** En esta etapa se obtienen los datos que pueden ser relevantes para el análisis del sistema de transporte. Éstos

incluyen un inventario sobre las estructuras de transportes así como sus características. a partir de datos de detectores y factores de planificación tales como utilización del suelo, distribución de ingresos estructura del vecindario y tipo de empleo.

**3. Obtención de la matriz de demanda.** En esta etapa se realizan encuestas domiciliarias y en el propio viario de la ciudad, para recoger la máxima información posible sobre los desplazamientos urbanos e interurbanos. Explicitándose en gran detalle la forma (modos de transporte) y motivos de los mismos. El procesamiento de las encuestas permite reflejar patrones de viajes existentes obtenidos entre pares de zona (Origen-Destino).

**4. Análisis del modelo.** El propósito de esta fase es establecer las relaciones entre las cantidades medidas en el apartado anterior y calibrar estas relaciones para el año base. Las relaciones se determinan mediante la utilización de ciertos modelos matemáticos, que son empleados de forma secuencial de tal forma que los datos de salida de un modelo son empleados como entrada del siguiente.

- **División modal.** Este modelo determina de forma porcentual, el reparto entre diferentes modos de transporte para el número total de viajes realizados entre cada par de zonas. El porcentaje de viajes entre dos zonas se obtiene en función de los tiempos de viaje, y del coste asociado a los modos de transporte, y ocasionalmente se incluye las características socioeconómicas y utilización de suelo.
- **Asignación de tráfico.** Estos modelos permiten localizar los viajes entre cada par origen-destino sobre diferentes rutas definidas en el viario. Estiman el volumen de tráfico y el tiempo de viaje en las calles en función de sus características, de acuerdo a ciertos paradigmas de comportamiento de los usuarios del sistema de transporte. Constituyen una de las etapas fundamentales del proceso de planificación de transporte.
- **Generación de viajes.** Este modelo sirve para determinar el número de viajes que se originan y terminan entre diferentes zonas del área de estudio. Estos valores, que son denominados producción y atracción se definen normalmente como función de la localización y características del uso del suelo y se dividen en categorías según el propósito de viaje como por ejemplo trabajo y ocio.
- **Distribución de viajes.** En este paso, se deducen fórmulas que describen la localización de viajes desde un origen hacia un destino. Estas fórmulas se obtienen como función de producción y atracción de diferentes zonas que han sido obtenidas con el modelo anterior y el coste de realizar el viaje entre ambas zonas.

**5. Previsión de Viajes.** Basándose en los datos recogidos en el primer paso y análisis de la tendencia se predice la utilización del suelo, distribución de la población, etc. para el futuro. Los modelos desarrollados y calibrados en el paso 4 son empleados para estimar la distribución y generación futura de viajes.

**6. Evaluación de la red.** Esta etapa permite contrastar la propuesta ofrecida en términos de costes y beneficios con los resultados de predicción de viajes.

## 1.2. Asignación de tráfico

Las bases de los actuales modelos de asignación de tráfico se deben a Wardrop (1952), del Road Research Laboratory, que describió los dos principios o paradigmas que rigen el comportamiento de los individuos en sus desplazamientos sobre la red. *El principio de equilibrio de usuario*, basado en el supuesto de “Todos los conductores selecciona la ruta que minimiza su coste de viaje” y *El principio de optimalidad del sistema* que indica que el tiempo total de viaje para todos los conductores es aquel que minimiza el tiempo total de los viajes del sistema. Estos dos principios han sido ampliamente aceptados y se conocen como los principios de Wardrop.

Beckmann (1956), formuló un problema de asignación de tráfico mediante modelos matemáticos empleando teoría de optimización no lineal. El modelo presenta una función objetivo convexa y su solución cumple las dos condiciones de Wardrop.

En ese mismo año, Frank y Wolfe (1956) desarrollaron un algoritmo iterativo para obtener la solución a problemas convexos de optimización cuadrática. Actualmente este algoritmo es un estándar en la planificación del transporte, encontrándose presente en la totalidad de aplicaciones profesionales que realizan procesos de asignación.

Después de estos pasos se han desarrollado y mejorado los algoritmos de asignación. Una de las mejoras fue la introducción de funciones aritméticas que relacionan el volumen de tráfico que circula por un tramo con el tiempo de viaje empleado o la velocidad desarrollada. Estas funciones son denominadas funciones *volumen-retraso* y funciones de *tiempo de viaje*. Un amplio resumen de los diferentes modelos y algoritmos de asignación pueden encontrarse en Patricksson (1994).

TRAMOS incorpora un nuevo modelo de asignación que considera la imposición de condiciones de contorno en el proceso de asignación Canca et al.(2002). Implica la incorporación de nuevas restricciones de igualdad en el modelo básico:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \sum_{a \in A} \int_0^{f_a} t_a(s) ds \\
 & \text{s.a.} \\
 & \sum_{r \in R_{pq}} h_{pqr} = d_{pq} \quad \forall (p, q) \in C \\
 & h_{pqr} \geq 0 \quad \forall r \in R_{pq}, \forall (p, q) \in C \\
 & \sum_{(p, q) \in C} \sum_{r \in R_{pq}} \delta_{pqr} h_{pqr} = f_a \quad \forall a \in A \\
 & f_a = PM_a \quad \forall a \in PM
 \end{aligned} \tag{1}$$

Donde  $A$  es el conjunto de arcos de la red,  $t_a$  es la función volumen retraso en el arco  $a$ ,  $f_a$  el flujo que circula por el arco  $a$ ,  $C$  es el conjunto de pares O/D,  $(p, q)$  es cada uno de los pares origen-destino contemplados en la matriz de demanda, donde  $p$  es el origen y  $q$  el destino,  $d_{pq}$  es la demanda correspondiente al par  $(p, q)$ ,  $h_{pqr}$  es el flujo correspondiente al camino  $r$  para el

par  $(p, q)$ ,  $\delta_{pqra}$  es un indicador que toma valor 1 si el arco  $a$  pertenece al camino  $r$  y  $PM_a$  es el volumen de vehículos que circula por el tramo  $a$ .

Para la resolución de los modelos se establece en cada arco una función de coste que debe ser creciente con la intensidad y tiene que otorgar un valor igual a infinito cuando la intensidad sea igual al volumen de vehículos especificado por el punto de medida. Las funciones definidas responden a la expresión (2):

$$t_{ij} = \frac{f(a_{ij}) - c_{ij}PM_a}{1 - \frac{v_a}{PM_a}} \quad (2)$$

$v_a$  : intensidad del tráfico.

$t_{ij}$  : coste o tiempo empleado en desplazarse por el arco.

$PM_a$  : volumen de vehículos que debe circular por el arco.

$c_{ij}$  : constante de preferencia de selección del tramo como componente de ruta.

El procedimiento de resolución se basa en aproximaciones lineales sucesivas, conjuntamente con el algoritmo de optimización de Frank-Wolfe.

## 2. Aplicaciones profesionales de planificación

A continuación, de manera sucinta se presentan las características más importantes de las aplicaciones de carácter profesional de mayor uso en el ámbito actual de la planificación del transporte, se reseñan en forma de tabla las similitudes y diferencias en comparación con TRAMOS.

1. EMME 2 es un sistema de planificación del tráfico urbano multimodal, que posee un amplio abanico de herramientas que permiten un estudio muy detallado, Florian (1977). El principio fundamental es la asignación de las matrices de la demanda (matrices Origen-Destino) a la red de transporte.

2. TRIPS es un paquete flexible de programas de planificación del tráfico que se puede utilizar para construir una amplia gama de modelos tanto en carreteras como en redes de transporte público.

3. TRANSCAD es una herramienta de planificación que incorpora un incorporado un sistema de información geográfico (GIS) que permite trabajar con mucho más detalle y precisión en lo referente a representación cartográfica.

4.- ESTRAUS, Fernández y De Cea (1990) es un modelo computacional que simula el comportamiento de un sistema de transporte urbano. Ha sido desarrollado por el Gobierno de Chile a través de SECTRA Software.

**Tabla 1.** Características de herramientas de planificación.

|  | Emme/2 | TRIPS | Transcad | Etraus | Tramos |
|--|--------|-------|----------|--------|--------|
| Red multimodal   | ●      | ●     | ●        | ●      | ●      |
| Modos combinados   | ●      |       | ●        |        | ○      |
| Congestión en todas las redes y restricción de capacidad en transporte público       | ●      |       |          | ●      | ●      |
| Modelos de distribución  | ●      |       | ●        | ●      | ○      |
| Modelo de partición modal  | ●      |       | ●        | ●      |        |
| Asignación de equilibrio determinista en redes de transporte público y privado.      | ●      | ●     | ●        | ●      | ●      |
| Equilibrio estocástico   | ●      |       | ●        |        |        |
| Equilibrio simultáneo  |        |       |          | ●      |        |
| Edición interactiva de redes y análisis de resultados con interfaz gráfico propio.   | ●      | ●     | ●        | ●      | ●      |
| Modificación on-line de parámetros.  | ●      | ●     | ●        | ●      | ●      |
| Compatibilidad con otros formatos gráficos (dwg, dxf)                                |        |       | ●        |        | ●      |
| Compatibilidad con otros paquetes de planificación                                   |        |       |          |        | Emme/2 |
| Recomendaciones sobre la posición de los detectores para calibración                 | ●      |       |          |        | ●      |
| Calibración de matrices de demanda a partir de datos de conteo                       | ▶      |       | ●        |        | ●      |
| Algoritmo para asignar el tráfico imponiendo condiciones de contorno sobre los arcos |        |       | ●        |        | ●      |
| Consideración explícita de intersecciones  |        | ●     | ●        | ■      | ●      |
| Múltiples zonificaciones para un mismo escenario                                     |        |       |          |        | ●      |
| Visualización gráfica de zonificaciones  |        | ●     | ●        |        | ●      |
| Aplicaciones a transporte de mercancías  |        |       | ●        |        | ○      |
| Composición de viajes multi-modo con ventanas temporales                             |        |       |          |        | ○      |
| Soporte GIS  |        | ▶     | ●        |        |        |
| Ayuda en el propio software  |        | ●     |          |        | ●      |
| Chequeo de la integridad del modelo  |        |       |          |        | ●      |
| Análisis de flujo de paso en zonas   |        |       | ▶        |        | ●      |
| Modelos de elección discreta poblacionales   |        |       | ●        |        |        |
| Lenguaje de desarrollo propio  | ○      |       | ●        |        |        |
| Módulo de manejo de matrices   |        |       |          |        | ●      |
| Modelos de desagregación temporal de matrices O/D                                    |        |       |          | ●      | ○      |
| Análisis de consumo de combustible   |        |       |          |        | ●      |
| Soporte para la construcción de funciones volumen-retraso                            |        |       | ■        |        | ●      |

● Presente ○ En desarrollo ▶ Posible en base a otros desarrollos externos ■ Soporte parcial

### **3. Nuevos modelos en planificación**

Una de las últimas incorporaciones de TRAMOS consiste en un modelo para la estimación de consumo de combustible. Los modelos de consumo basados en la velocidad media relacionan el consumo de combustible con el tiempo de viaje, o recíprocamente con la velocidad media. Estos modelos son convenientes para estimar el consumo total de combustible del tráfico en sistemas urbanos grandes y para asesorar a los centros de gestión de tráfico, ya que éstos influyen sobre las velocidades medias y en los niveles de demanda de viajes. El modelo integrado en TRAMOS supone una modificación y refinamiento de los trabajos de Herman y Ardekani (1985). El proceso a seguir en TRAMOS sigue tres pasos fundamentales:

1.- Recogida y análisis de la información. El objeto de esta etapa es la clasificación del parque automovilístico para obtener un árbol de probabilidades, donde cada categoría a la que pueda pertenecer un vehículo tenga asignada una probabilidad o porcentaje.

2.- Diseño y calibración de las funciones de consumo. El modelo de consumo de combustible empleado relaciona la velocidad media del vehículo en un tramo con el consumo de combustible en la vía, proporcionando el consumo por unidad de distancia y vehículo.

3. Obtención de velocidades medias en los arcos de la red, cálculo del consumo medio por tipo de vehículo (en función de la descomposición realizada en el paso primero) y su posterior agregación por tramo.

En cuanto a procedimientos para la previsión de viajes TRAMOS incorpora dos métodos que permiten ajustar los resultados en relación a mediciones reales. El primero está basado en algunas mejoras sobre el procedimiento propuesto por Lei (1995).

El segundo método aprovecha los resultados intermedios ofrecidos por el proceso de asignación. La calibración mediante porcentajes se basa en repartir el exceso o defecto de intensidad en los tramos con contadores, entre todos los caminos que utilizan ese tramo y en proporción a la cantidad de vehículos que aportan al conteo total asignado. Así, cada tramo con detector dicta una modificación en uno o más de un elemento de la matriz de viajes. Estos incrementos o decrementos de los elementos de la matriz O/D producirán variaciones en los flujos tras una nueva asignación, de manera que se elimine la diferencia entre flujos reales y asignados, Canca y Racero (2003).

### **4. Conclusiones**

El trabajo presentado resume algunos aspectos de la herramienta TRAMOS para el estudio de problemas de tráfico y planificación de transporte en entornos metropolitanos. El documento se centra de forma exclusiva en aspectos relacionados con planificación, resumiendo algunos de los nuevos modelos incorporados y realizando una comparación sucinta frente a algunas de las herramientas de mayor utilización en el ámbito profesional y académico. No se consideran las herramientas dedicadas al soporte para el control de tráfico y la simulación de soluciones que constituyen algunos de los elementos fundamentales en el diseño integral de esta aplicación.

## Referencias

- CANCA D., RACERO J., SÁNCHEZ J.R y, EGUÍA I. (2002). Una experiencia en la asignación de tráfico con condiciones de contorno. CIT2002. Ingeniería de los transportes o la vocación a un desafío permanente. Dpto. Ing. Transporte. Univ. Cantabria. Vol III. pp. 1317-1326.
- CANCA D. y RACERO J.(2003). Urban demand prediction using historical data and actual traffic counts. 10 ITS World Congress. , Madrid, Noviembre 2003. ERTICO.
- DOMENCICH, T. y MCFADDEN, D. (1975). Urban Travel Demand: A Behavioral Analysis, vol 93 of Contributions to Economic Analysis, North-Holland, Amsterdam.
- FERNÁNDEZ J. E y DE CEA J. (1993). Transit Assignment for congested public transport systems; an equilibrium model. Transportation Science 27(2). pp. 133-147.
- FERNÁNDEZ J. E y DE CEA J. (1990) An application of equilibrium modelling to urban transport planning in developing countries: the case of Santiago de Chile. H. E. Bradley (ed.). Operational Research 90. Pergamon Press.
- FLORIAN M. (1977). A traffic equilibrium model of travel by car and public transit nodes. Transportation Science 8, pp. 16-179.
- FRANK, M. y P. WOLFE (1956). An algorithm for quadratic programming. Naval research logistics quarterly 3 (1-2), 95-110.
- HERMAN R. y ARDEKANI, S. (1985) The Influence of Stops on Vehicle fuel consumption in Urban Traffic, Transportation Science, 19, 1-12
- LEI, P. (1995) Column Generation Algorithm for estimate Matrix Origin-Destination.
- PATRICKSSON M. (1994) The Traffic Assignment Problem. Models and Methods. VSP Ed. Utrecht, The Netherlands..
- WARDROP, J. G. (1952). Some theoretical aspects of road traffic research. Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Part II 1, 325-378.