



**Certificación ISO 9001:2000**  
**Laboratorios acreditados por EMA**

---

---

# **CONTROL DE FLUJOS CARRETEROS DE CARGA POR INDUCCIÓN EN LA SELECCIÓN DE RUTA**

Eric Moreno Quintero

**Publicación Técnica No 270**  
**Sanfandila, Qro, 2005**



---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**

**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Control de flujos carreteros de carga por  
inducción en la selección de ruta**

Publicación Técnica No 270  
Sanfandila, Qro, 2005

---



Este trabajo fue realizado en la Coordinación de Integración del Instituto Mexicano del Transporte por el Dr. Eric Moreno Quintero. La investigación se basó en una parte de la tesis doctoral del autor en el campo del transporte carretero de carga. La tesis, titulada *Planner-User Interactions in Road Freight Transport. A Modelling Approach with a Case Study from Mexico*, (Interacciones Planificador-Usuario en el Transporte Carretero de Carga. Un Enfoque de Modelación con un Caso de Estudio de México) se desarrolló en el Institute for Transport Studies, de la Universidad de Leeds, Reino Unido; fue terminada y aceptada por la Universidad de Leeds en septiembre de 2004.



# Contenido

---

<b>Resumen</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>Resumen ejecutivo</b>	<b>vii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2 El marco de modelación del transporte de carga</b>	<b>5</b>
2.1 Características básicas del transporte de carga	5
2.2 Algunas clasificaciones de modelos de de carga	10
2.3 Un enfoque sistémico	16
<b>3 La cuestión del mantenimiento carretero</b>	<b>21</b>
3.1 Externalidades y tarificación vial ( <i>road pricing</i> )	23
3.2 Experiencias recientes en tarificación vial	25
<b>4 Control óptimo de flujos de carga por inducción en la selección de la ruta</b>	<b>31</b>
4.1 Las interacciones entre el responsable de la carretera y los usuarios	32
4.2 El enfoque de modelación	35
4.3 La formulación del modelo matemático	38
4.4 Un ejemplo ilustrativo	42
4.5 Consideraciones sobre la implantación	45
<b>5 Modelado del control de flujos de carga en una parte de la red carretera nacional</b>	<b>49</b>
5.1 Antecedentes del estudio de caso	50
5.2 Escenarios considerados	53
5.3 El escenario de la red de prueba completa	56
5.4 El escenario, sólo con la red libre de peaje	61
<b>6 Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>69</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>73</b>





El autotransporte de carga, si bien es fundamental para la actividad económica, genera impactos en la infraestructura que son reparados y costeados por el encargado del mantenimiento vial. El punto de vista del responsable de las carreteras que se encarga de la conservación de la infraestructura, y que busca minimizar sus costos de mantenimiento, en general es opuesto al de los transportistas, quienes buscan las mejores rutas para mover sus cargas en términos del menor costo de operación vehicular.

En un análisis basado en la optimización de la utilidad esperada por el operador de transporte, en este trabajo se modela la interacción entre el responsable del camino y el transportista que usa la autopista en una red carretera con un subconjunto de tramos de cuota, considerando dos clases de costo: 1) el costo de operación vehicular que guía la selección de ruta por los operadores y es afectado por las acciones de la autoridad de carreteras; y 2) los costos de mantenimiento y reparación del camino, que dependen del tránsito de los distintos tipos de vehículos y del costo administrativo de los controles para el tráfico de carga.

Suponiendo que los transportistas eligen las rutas que minimizan su costo de operación, el modelo presentado explora el cambio en la selección de ruta que resulta de ofrecer un descuento en las autopistas de cuota, a fin de motivar al operador a usar estas infraestructuras, para las que en general se dispone de más ingreso para recuperar costos de mantenimiento, que en el caso de las carreteras libres.

Utilizando simulación Monte Carlo se resuelve la asignación de tránsito sobre la red carretera, para determinar incentivos a los operadores que inducen un desvío de tránsito de los tramos libres hacia los de cuota. Los incentivos óptimos se estiman para una porción de la red carretera mexicana pavimentada, obteniéndose en consecuencia un aumento en el uso de las autopistas de cuota, y la reducción de tránsito sobre la red libre de peaje; para la cual se dispone generalmente de menos recursos por km para su mantenimiento.

El análisis de las cadenas causa-efecto en este modelado sistémico, junto con los resultados numéricos obtenidos indican que el esquema de incentivo propuesto a los operadores puede reducir los niveles de gasto de conservación en las carreteras libres de peaje, en comparación con la situación original de no hacer nada, con la ventaja adicional de que no hay que crear nuevas cuotas o impuestos que pudieran representar un costo social adicional del sistema de transporte de carga.



## Abstract

---

Road freight transport, even if essential to economic activity, generates infrastructure impacts that are repaired and paid by transportation planning agencies. The viewpoint of road planner, engaged with road maintenance and looking for the minimal cost of road repairs, generally is opposed to that of hauliers, who usually are in the search of the best routes to move their loads, in the sense of getting minimal operation costs.

On the basis of an expected utility analysis of the lorry operator, in this work the interactions between the road planner and the hauliers running on a road network partially tolled is developed, taking into account two types of cost: 1) the vehicle operation cost, guiding the route choice for the lorry operators, and influenced by road planner actions, and 2) the road repair and maintenance costs, depending on the different vehicle types and the administrative costs of the traffic controls currently implemented.

Assuming that operators' route choice is based on the minimal operation cost, the model shown look for the changes in the route choice resulting from the toll discount offered on the charged links of the road network in order to stimulate hauliers to use these links, which in general have higher budgets for road maintenance and better structural conditions than those found on the non-tolled links.

A Monte Carlo procedure solves the traffic assignment on the road network, as to find the proper economic incentives that induce a traffic shift to the tolled links. Optimal incentives are estimated for a portion of the Mexican paved network, giving as a result an increased freight flow on the charged links and the consequent reduction of traffic on the non-tolled links, where less resources are available for maintenance.

The cause-effect analysis in the modelling work, along with the numerical results obtained suggest that the economic incentive scheme proposed lessen the levels of maintenance spending on the non-tolled links, compared to the original situation of doing nothing, having the additional advantage of avoiding the creation of new tolls or taxes representing an extra social cost of the road freight transport system.



## Resumen ejecutivo

---

El autotransporte de carga, no obstante el papel imprescindible que juega en la actividad económica nacional, conlleva la generación de impactos no deseados que es necesario controlar, como es el caso del congestionamiento; los accidentes; el ruido; y el deterioro de la infraestructura.

La actividad del transporte de carga, a diferencia de la correspondiente al de pasajeros, se caracteriza por la presencia de diversos actores que intervienen en la generación de los movimientos de carga. Productores, consumidores, cargadores, transportistas, operadores logísticos, proveedores de infraestructura y policías de caminos interactúan entre sí en las diversas etapas desde la carga del vehículo en su origen y su movimiento sobre la red carretera, hasta la descarga final en su destino.

Mientras que las interacciones entre productores, consumidores, cargadores y transportistas se resuelven a través de señales de precios, fletes, niveles de servicio, o tiempos de entrega; las interacciones entre los usuarios del camino y el responsable del mismo que debe proveer una infraestructura adecuada para el movimiento de cargas se soluciona con las reglamentaciones del uso de la infraestructura (pesos, longitudes y velocidades máximas), y con los peajes en el subconjunto de las autopistas de cuota.

En el sistema carretero nacional, donde la red libre de peaje supera en mucho la extensión de la red de autopistas de cuota, la cuestión del mantenimiento carretero se torna sumamente difícil de manejar, dada la dependencia de los presupuestos de conservación del proceso ordinario de asignación, que anualmente se discute y negocia en los distintos niveles parlamentarios, nacional y estatal, y la dificultad de canalizar recursos captados en las autopistas de cuota a la conservación de todo el sistema carretero.

Las interacciones entre el usuario de la carretera y el responsable de su mantenimiento, resultan entonces de interés para buscar formas de controlar el tráfico de carga en la red carretera sin menoscabo del nivel de servicio que requiere la actividad del transportista; pero que permitan tener un uso más racional de la infraestructura.

En este trabajo se analizan las interacciones entre el usuario del camino y el responsable de su conservación en un marco sistémico, y se propone una medida de control de tráfico que permite una mejor asignación de los flujos entre el sistema de autopistas de cuota y la red libre de peaje.

Luego de una introducción a la problemática del control de tráfico de carga carretero en el capítulo 1; en el capítulo 2 se aborda el tema de las interacciones entre el usuario del camino y el responsable de su mantenimiento dentro del proceso de modelación del transporte de carga.

En el capítulo 3 se analiza la cuestión del mantenimiento carretero, y se revisan algunos esquemas recientes de tarificación vial que se han puesto en marcha en

diversos países, y que han contribuido a aliviar la problemática de la conservación carretera.

En el capítulo 4 se analizan con detalle los antecedentes necesarios de modelación de la selección de ruta por los usuarios del camino, bajo un esquema de incentivo económico que modula el responsable de la carretera y que tiene por objetivo lograr una mejor reasignación del tráfico de carga entre el sistema de carreteras libres de peaje y las autopistas de cuota. En este capítulo se explica el modelo matemático utilizado, así como el procedimiento de solución empleado, que se basa en simulación Monte Carlo para estimar los valores óptimos del incentivo económico ofrecido a los usuarios de la carretera.

En el capítulo 5 se desarrolla un breve estudio de caso centrado en una porción de la red nacional pavimentada; localizada en el noroeste del país, en el corredor que va de San Luis Potosí a Nuevo Laredo. En este capítulo se muestran los resultados numéricos de las corridas de simulación de las asignaciones de flujos vehiculares en diversos escenarios, en los que se variaron el valor del tiempo, el error de percepción de costos de los usuarios, el tipo de camino (de cuota o libre de peaje), y los costos de deterioro del pavimento.

Finalmente, en el capítulo 6 se resumen las conclusiones encontradas en el trabajo, resaltando como principal el hecho de que a juzgar por los resultados numéricos obtenidos, la política propuesta de modular los repartos del flujo vehicular entre las autopistas de cuota y las libres de peaje, genera mejores resultados en el manejo del presupuesto de conservación que la política nula de no hacer nada. Además, puede observarse también que esta política de incentivo económico a los usuarios del camino reduce el gasto total del administrador del sistema carretero sin recurrir a la creación de nuevos impuestos o peajes, y que tiene la ventaja adicional de incrementar la captación del impuesto al valor agregado debido al aumento del flujo vehicular, justamente en los tramos de cuota del sistema carretero.

# 1 Introducción

---

El transporte carretero de carga, indudablemente ofrece un apoyo crucial a la dinámica económica en cualquier parte del mundo. La producción del servicio de transporte, sin embargo, conlleva conocidos impactos no deseados tales como la congestión, los accidentes, la contaminación ambiental, y el deterioro de la carretera.

Todos estos impactos, a excepción del deterioro del camino, son comunes a cualquier tipo de vehículo. El daño al camino, sin embargo, se ha señalado en la literatura del transporte como un impacto atribuible exclusivamente a los camiones de carga; básicamente debido a que el peso bruto vehicular de los camiones cargueros es mucho mayor comparado con el de los automóviles y el de los autobuses. Este impacto además, no es percibido de inmediato por los operadores, a diferencia de los otros impactos citados; y esto dificulta en buen grado la toma de conciencia de la magnitud de este impacto por parte de los usuarios del camino que mueven sus cargas en la red carretera.

El análisis de los flujos de carga ha usado frecuentemente el enfoque económico que explica el inicio de estos movimientos como una consecuencia de la interacción entre la demanda y la oferta planteada por los productores y los consumidores de las mercancías que transitan. Los actores considerados en este enfoque tales como productores, consumidores, embarcadores, transportistas y operadores logísticos participan directamente en la operación del transporte; y en este contexto el administrador o responsable de la carretera es visto solamente como un proveedor de infraestructura, que impone reglamentos para alcanzar metas de beneficio colectivo como la reducción de los accidentes, la congestión, o la contaminación ambiental. No obstante, las obligaciones del administrador de la carretera para garantizar un desempeño adecuado de la infraestructura, aunadas al carácter fiscal que tiene buena parte de su presupuesto, y a su capacidad legal para imponer medidas regulatorias de los flujos carreteros (límites de velocidad, peso y dimensiones, cuotas, etc) le da el derecho de participar activamente en la modulación de estos flujos a fin de utilizar su presupuesto de conservación, de la manera más eficiente posible.

El tráfico carretero de carga es resultado de la decisión de múltiples actores. productores y consumidores que ofrecen y demandan productos; cargadores interesados en mover estos productos; transportistas que ofrecen sus servicios y que circulan sobre la red carretera; operadores logísticos que ofrecen servicios de consolidación, seguimiento e información; e instancias federales, estatales y municipales encargadas de proveer la infraestructura necesaria y su conservación. Estos actores, siguiendo sus propios objetivos y criterios interactúan entre sí, y generan los flujos de carga.

El impacto principal del autotransporte de carga en el camino no es la congestión, sino el daño a la infraestructura; tiene que ver más con los pesos en los ejes de

los camiones, que con la congestión y la contaminación resultantes. Es por esto que se puede considerar al administrador de la carretera como un actor comprometido con el mantenimiento del camino, interesado en el tráfico de carga y afectado por la elección de rutas de los transportistas.

En este marco de análisis para el autotransporte de carga, la red carretera es el mecanismo de oferta, regulado por el administrador, conforme a su objetivo: minimizar el gasto total de mantenimiento. La descripción coincide con el conocido paradigma del *Diseño de redes* (Network design) (Magnanti & Wong, 1984). De modo conciso, Gentile & Papola (2001) describen el problema de Diseño de redes como *la búsqueda de una configuración de una red de oferta de transporte y un patrón de demanda de flujo, que conjuntamente maximizan una función objetivo de tipo social a la vez que respetan las restricciones de oferta-demanda*. Naturalmente, el balance entre los beneficios para los usuarios y el costo de los cambios requeridos es tomado en cuenta.

En línea con este punto de vista, políticas recientes orientadas a que el autotransporte cubra los costos que genera por la utilización de la infraestructura a fin de reducir el uso de fondos públicos, han sugerido buscar maneras eficientes para manejar cualesquiera recursos dedicados a la reparación y mantenimiento carreteros. Un ejemplo reciente de nuevas medidas dirigidas al financiamiento de la conservación carretera son los peajes para el autotransporte de carga, que se basan no en el número de ejes de los vehículos sino en la distancia recorrida en la red carretera. Estos esquemas de peaje ya se han instalado en varios países europeos: en Suiza en 2002; en Alemania en 2003; en Austria en 2004; en la República Checa ya se desarrolla un proyecto similar y en los estados norteamericanos de California y Oregon se empieza a discutir la implantación de estas ideas en sus sistemas carreteros (Dalbert, 2001; European Commission, 2001, FTA Online, 2003; ASFiNAG, 2004; bmvit, 2005; Lockridge, D., 2005).

En una red carretera parcialmente tarifada, el administrador podría inducir a los transportistas a desviarse hacia los tramos de cuota con un estímulo económico. De esta manera el tráfico desviado de los tramos libres de peaje en la red, donde los presupuestos para reparaciones y la calidad del camino, usualmente son limitados, iría hacia los tramos de cuota donde el ingreso del peaje permitiría recuperación de costos, y la mejor calidad del camino resultaría menos afectada por los pesos en los ejes de los camiones.

El papel del administrador podría especializarse aún más al haber uno responsable de la red libre de peaje y otro a cargo del subsistema de peaje. Este es el caso, por ejemplo, de una agencia gubernamental independiente (aunque reportando a la Secretaría del Transporte) responsable del peaje, y un administrador federal dedicado a mantener la red libre.

Bajo ese punto de vista, en este trabajo se presenta un modelo de asignación estocástica de tráfico, basado en un modelo Probit, en el cual las interacciones entre el usuario del camino y el responsable de la carretera se dan en el marco de la optimización de la utilidad esperada para cada uno de los actores. Para el transportista, tal utilidad está representada por el costo esperado del viaje que



realiza; mientras que para el responsable del camino, la utilidad viene a ser el costo total de mantenimiento del camino que tiene que enfrentar. El resultado final muestra que es posible influir en la selección de ruta que hacen los camiones de carga, de manera que se tengan escenarios de menores costos de mantenimiento para el responsable de la carretera, y mejores condiciones de viajes para los transportistas.



## **2 El marco de modelación del transporte de carga**

---

La complejidad de los problemas que surgen en el transporte de carga, donde múltiples actores intervienen en el movimiento de las mercancías, así como la serie de cadenas de causa – efecto de tipo físico, económico y normativo influyen en el proceso de toma de decisiones, requiere del uso de modelos; es decir, representaciones simplificadas, pero significativas de la realidad que además se presten al análisis lógico. Los buenos modelos ayudan a entender las bases de la mecánica que subyace en los tópicos de transporte de carga estudiados, y de esta manera proporciona orientación en la búsqueda de medidas de control y de afectación enfocadas a mejorar el estado presente de los sistemas de transporte.

La mayor parte de los logros en el estudio sistemático del transporte que se inició en la década de 1950, se ha concentrado en el movimiento de pasajeros. Algunas de las razones que explican esto son la alta prioridad que tiene el congestionamiento del transporte urbano en el mundo industrializado, y la dificultad de modelar objetivos distintos y a veces opuestos entre los diversos actores involucrados en el transporte de carga (Ortúzar y Willumsen, 1994, p. 30). Este último aspecto explica la gran diversidad de modelos de demanda de transporte de carga que se han desarrollado y, tal como lo observa Winston (1983, p. 419) una causa primera es que la identificación clara y precisa del responsable de las decisiones en el transporte de carga no es un asunto fácil.

Adicionalmente, la falta de métodos eficientes para resolver problemas de flujos de transporte de carga a gran escala, y el carácter confidencial que la información tiene para algunos actores (p ej, cargadores y transportistas), que no estarían dispuestos a compartir información con un valor comercial implícito (p ej, tarifas negociadas, toneladas movidas, destinos servidos, etc) contribuyen a la escasez de estudios de transporte de carga (Regan y Garrido, 2001).

En este capítulo se hace una revisión general de los principales enfoques que se han seguido en la modelación del transporte de carga, que si bien no es exhaustiva, identifica sus características básicas y utilidad potencial a fin de tener un marco de referencia que permita orientar la discusión relativa a la búsqueda de mejoras al desempeño de los sistemas de transporte de carga que se encuentran en la práctica.

### **2.1 Características básicas del transporte de carga**

Lo primero que se puede observar de la literatura, es una carencia de estudios de transporte de carga en comparación con los efectuados para transporte de pasajeros. Una muestra de ello se aprecia en la tabla 2.1, que exhibe los resultados de una búsqueda hecha en la base de datos TRIS Online, del Transportation Research Board norteamericano (TRB, 2005), en la que se

incluyeron términos relacionados con el transporte de carga y con el de pasajeros. La profusión de trabajos en el área de pasajeros, comparada con la de carga salta a la vista.

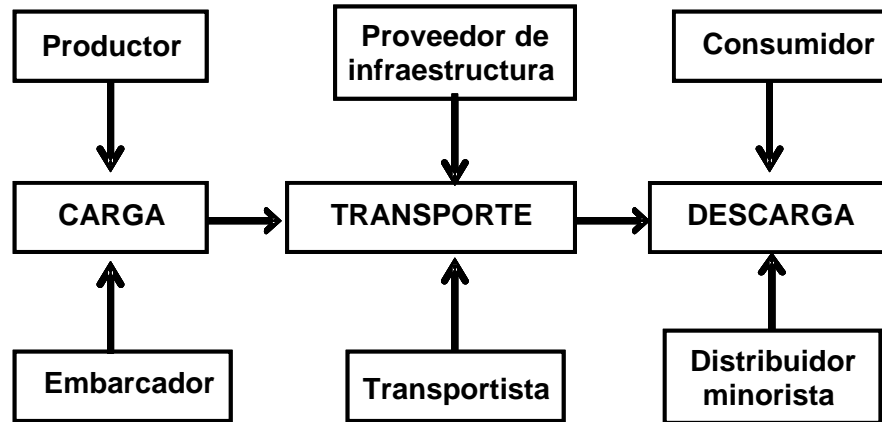
**Tabla 2.1**  
**Escasez de estudios de carga en comparación con los de pasajeros (fuente: TRIS Online, 2005)**

Búsqueda	Término sobre transporte de carga	Número de citas	Término sobre transporte de pasajeros	Número de citas
1	(goods) OR (freight)	17.990	(passenger) OR (public transport) OR (commuter)	27.153
2	(lorry) OR (truck) OR (goods vehicle)	22.760	(car) OR (automobile)	28.273
3	(traffic) AND ( lorry OR truck OR (goods vehicle) )	2.833	(traffic) AND (car OR automobile)	4.312
4	(impacts) AND ( lorry OR truck OR (goods vehicle) )	882	(impacts) AND (car OR automobile)	1.800
5	(road pricing) AND ( lorry OR truck OR (goods vehicle) )	18	(road pricing) AND (car OR automobile)	48
6	(congestion) AND ( lorry OR truck OR (goods vehicle) )	207	(congestion) AND (car OR automobile)	434
7	(accidents) AND ( lorry OR truck OR (goods vehicle) )	1.804	(accidents) AND (car OR automobile)	2.411
<b>Suma :</b>		<b>46.494</b>		<b>64.431</b>

Para adentrarse en el tema de transporte de carga un punto de inicio es considerar los aspectos particulares de esta actividad que resulta pertinente tomar en cuenta para las tareas de modelación, y que tienen que ver con la naturaleza de la carga en sí.

Mahmassani (2001) hace notar que en general, y a diferencia de los pasajeros, la carga es inanimada y pasiva (excepto el movimiento de animales vivos), y raramente regresa a su origen. Además, la carga en sí no tiene actitudes ni percepciones, ni tampoco hábitos o comportamiento adaptativo, y ciertamente es incapaz de aprendizaje alguno. La carga en sí no sufre del tiempo de traslado ni del tiempo de espera, ni tampoco de las demoras o aun del abandono o de un mal almacenaje. De acuerdo con Mahmassani (2001) estas características de la carga han limitado el entusiasmo de los modeladores que utilizan enfoques conductistas o utilitaristas.

Aparte de estas observaciones, la carga claramente tiene un *valor económico* (cualquier carga comercial) y/o *atributos físicos* (p ej, desechos industriales, materiales peligrosos) que requieren de la atención de alguien. De esta manera, la carga requiere actores que se involucren en la secuencia básica de carga, transporte y descarga, como se ilustra en la figura 2.1.



**Figura 2.1**  
**Secuencia básica del movimiento de carga, y actores involucrados**

Esta necesidad de agentes para resolver las distintas etapas de los movimientos de carga de modo natural abre espacios para la intervención de productores, embarcadores, proveedores de infraestructura, transportistas y consumidores. En suma, el rasgo fundamental del transporte de carga es la presencia de múltiples actores implicados en el traslado de productos y mercancías, y como sería de esperar, actores que persiguen sus propios objetivos.

### **Las diferencias entre carga y pasajeros**

La diversidad de diferencias entre los enfoques de modelado para el transporte de pasajeros y el transporte de carga, se encuentra en la literatura; al respecto, la tabla 2.2 se resumen las principales diferencias encontradas, enmarcadas en el clásico paradigma de las cuatro etapas usado en planeación del transporte.

Estas diferencias revelan la necesidad de ajustar los métodos de uso común en el transporte de pasajeros para que se adapten a la distinta naturaleza que tienen los movimientos de carga, así como la necesidad de abordar otros problemas que no aparecen en el tráfico de pasajeros, como por ejemplo la gestión del movimiento de camiones cargueros vacíos, o la aplicación de políticas óptimas de inventario.

De particular importancia es la diferencia que existe en el costo generalizado del transporte. Mientras que en el caso de los pasajeros este costo depende del valor del tiempo (VDT), el tiempo de espera en terminal y el tiempo de traslado; en el caso de la carga, el costo es afectado por tres componentes principales: los costos monetarios, los costos relacionados con el tiempo, y los costos relacionados con los riesgos implícitos en el movimiento de las cargas (Lalwani, et al, 1991; Ortúzar y Willumsen, 1994).

**Tabla 2.2**  
**Diferencias en el modelado del transporte de pasajeros y en el de carga**  
**(Lalwani, et al, 1991; Ortúzar y Willumsen, 1994; Wynter, 1995; Cambridge**  
**Systematics, 1997; De Jong, 2000; Mahmassani, 2001; De Jong, Jun y Walter,**  
**2004)**

	Aspecto	Transporte de pasajeros	Transporte de carga
<b>GENERACIÓN</b>	Propósito:	Trabajo, escuela, compras, etc.	a) Servicio público de transporte de carga b) Privado
	Terminales:	Requiere mínima asistencia en abordar, descender y conectar a otros modos.	Requiere diversas instalaciones, equipos y personal para carga y descarga. Las conexiones intermodales son relativamente especializadas por tipo de carga.
	Actores:	El pasajero.	Productores, consumidores, cargadores, transportistas, proveedores logísticos, autoridades carreteras.
		Un gran número de decisores; cada uno aportando una parte muy pequeña de la demanda.	Varios decisores, menos que en el caso de pasajeros, pero algunos de ellos controlando importantes fracciones de la demanda.
	Unidades de medida:	Pasajeros, automóviles.	a) Por la carga: toneladas, metros cúbicos b) Por el vehículo: camiones, remolques c) Por el valor económico de las cargas d) Por vehículos ligeros equivalentes
<b>DISTRIBUCIÓN</b>	Flujo del tráfico:	Usualmente hay viaje de ida y viaje de regreso.	a) Usualmente la carga no regresa b) Requiere minimizar el retorno de vehículos vacíos
		Hay flexibilidad para cambiar de destino (p. ej. los viajes por compras o diversión)	Usualmente no hay flexibilidad para cambiar el destino
<b>ELECCIÓN DE MODO</b>	Actores:	Los pasajeros.	Frecuentemente, el embarcador.
	Factores de decisión:	a) Relativos a utilidad: tiempo de viaje, costo, confort, etc. b) Relativos al pasajero: edad, sexo, ingreso, etc.	a) Relativos a la carga: peso, tamaño del embarque, embalaje, fragilidad, calidad de perecedero, etc. b) Relativos al cargador: política de inventario, ubicación de instalaciones, prácticas de carga. c) Relativos al consignatario: ubicación y requerimientos de descarga, política de inventarios. d) Relativos al modo: tarifa, velocidad, riesgo de daño, frecuencia.
		Valor del tiempo (VDT)	a) Basado en el ingreso del viajero b) VDTs de caminata y espera parecen ser mayores al del tiempo a bordo del vehículo
<b>COSTO GENERALIZADO</b>	Factores:	a) Tiempo a bordo del vehículo b) Tiempo de caminata c) Tiempo de espera d) Tiempo de transbordos e) Tarifa f) Costos en terminal	a) Desembolso monetario b) Tiempo puerta-a-puerta c) Variabilidad del tiempo de viaje d) Tiempo de espera hasta la entrega e) Probabilidad de pérdida o daño a la carga

Los costos monetarios incluyen los gastos directos que se originan en el movimiento de carga, como impuestos, fletes, peajes, uso de terminales, etc.

Los costos relacionados con el tiempo, generalmente se asocian con el servicio puerta-a-puerta. Estos costos podrían cuantificarse utilizando la tasa de interés sobre el capital de trabajo implícito en las mercancías en tránsito. Sin embargo, esta conversión monetaria del tiempo no es única.

En un estudio de Fowkes, Nash y Tweddle (1989) se emplearon técnicas de preferencia establecida para evaluar las actitudes de los embarcadores, acerca de las compensaciones entre el precio de las tarifas de transporte y los atributos de calidad de éste, como por ejemplo las demoras en la entrega. El estudio demostró que las mercancías de baja densidad económica (p ej, fertilizantes) generalmente requerían niveles más bajos de servicio en la distribución; de modo que los embarcadores de estos productos aceptaban fácilmente una reducción de la calidad del servicio a cambio de tarifas menores. Así, por ejemplo, la valuación relativa de una variación de medio día en el traslado de mercancía, expresada como un porcentaje de la tarifa de transporte cobrada, se reportó de un 5% para todos los movimientos de fertilizantes, en comparación con los valores reportados de 29% para la cerveza, y 32% para el papel (Fowkes, et al, 1989, p. 23).

En un estudio del mismo estilo, Kaatama examina las actitudes de un grupo de importadores y exportadores finlandeses respecto al costo monetario del transporte y sus respectivos atributos (Lalwani, et al, 1991, p. 139). Este estudio reveló que el atributo del costo monetario es un factor clave en la selección del modo de transporte, aunque su importancia fue menor al evaluar los atributos de velocidad y confiabilidad en el movimiento de carga.

La necesidad de expresar el tiempo en términos monetarios, igual que en el transporte de pasajeros, ha motivado estudios del valor del tiempo (VDT) para el transporte de carga. En la literatura del transporte de carga se reportan dos métodos principales para calcular valor del tiempo en el transporte de carga: a) el método de los factores del costo; y b) el método basado en modelos de elección discreta (De Jong, et al, 1992; Gwilliam, 1997). El método de factores de costo examina los costos de operación que cambian a medida que transcurre el tiempo; mientras que los métodos con base en elecciones discretas, utilizan datos observados o datos de encuestas que reflejan los cambios en preferencias que dependen del tiempo empleado en los movimientos de carga.

Los costos relacionados con los riesgos del movimiento de la carga reflejan tanto el impacto del daño o pérdida de la carga como la posibilidad de demoras en la entrega. Aun cuando los dos primeros elementos se relacionan directamente con los valores monetarios de las cargas, y las demoras están ligadas al tiempo, todos estos factores son de naturaleza aleatoria; de modo que el uso de probabilidades, valores esperados o desviaciones estándar, resultan aplicables para propósitos de cuantificación.

Ortúzar y Willumsen (1994, p 393) reportan el aparente origen de una función de costo generalizado para la demanda de transporte de carga en un trabajo de Kresge y Roberts en 1971. Esta función es lineal y considera las siguientes

variables: el desembolso monetario por el flete; el tiempo de la entrega puerta-a-puerta, y una medida de su variabilidad; el tiempo de espera desde la solicitud del servicio hasta la entrega; y la probabilidad de daño o pérdida de las mercancías en tránsito.

Para un producto determinado que se mueve entre un origen y un destino específicos, la fórmula del costo es:

$$C = M + b_1T + b_2\sigma + b_3W + b_4P$$

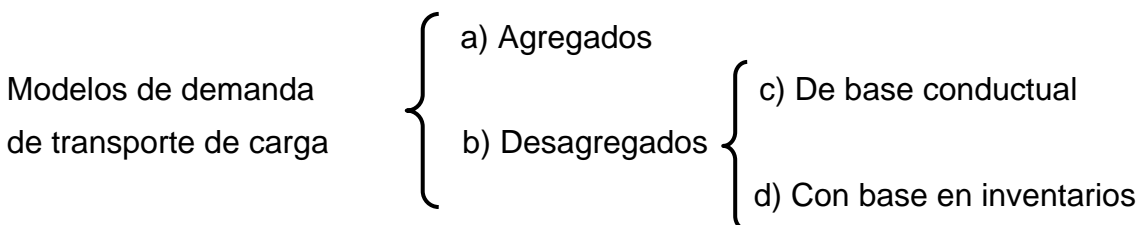
donde C es el costo del servicio de transporte; M el desembolso monetario por el flete; T el tiempo para del servicio puerta-a-puerta y  $\sigma$  su desviación estándar; W el tiempo de espera desde la solicitud del servicio hasta la entrega final; y P la probabilidad de daño o pérdida de la carga.

En el modelado de pronósticos de transporte de carga también se han usado enfoques estocásticos. Garrido y Mahmassani (1998) desarrollaron un marco de referencia para el análisis, la descripción y el pronóstico de los flujos de carga teniendo en mente objetivos operacionales y tácticos. El modelo econométrico que presentan es dinámico e incorpora las características temporales y espaciales de la demanda del transporte dentro de un marco de modelación estocástica.

El problema específico de interés es la caracterización de los patrones de embarque, en el sentido siguiente: dada una región geográfica R con información parcial de su actividad socio económica, calcular la probabilidad de que un producto dado C tenga que ser movido desde el origen O durante un intervalo de tiempo "t" y entregado en el destino D. La demanda de transporte resulta entonces un proceso estocástico con efectos de interacción tanto espaciales como temporales. Entre las conclusiones de este trabajo está el ser aparentemente el primer reporte de este tipo que muestra un enfoque unificado espacio-temporal del problema de la demanda de transporte de carga.

## 2.2 Algunas clasificaciones de modelos de carga

La gran diversidad de los estudios de transporte de carga ha motivado a algunos investigadores a la búsqueda de categorizaciones para manejar esta diversidad. Distintas taxonomías pueden encontrarse, dependiendo de la perspectiva del investigador. Winston (1983) propone la categorización que se muestra enseguida para los modelos de demanda del transporte.



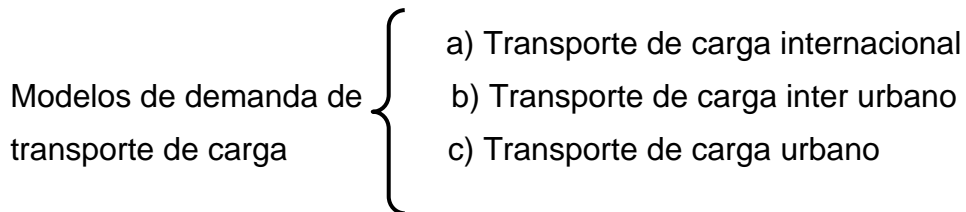


La clasificación de agregados/desagregados se refiere al tipo de datos que utilizan los modelos. Los datos que alimentan los estudios agregados representan características colectivas como, por ejemplo, las de grupos de productos transportados, o regiones y segmentos de mercado; mientras que los datos usados en los modelos desagregados representan características individuales de los que toman las decisiones al elegir las opciones del transporte de carga.

En la clasificación de modelos agregados, Winston describe los primeros intentos de los estudios de elección modal usados en el transporte de carga para estimar las fracciones del mercado controladas por los modos competidores, y los modelos que derivan la función de demanda del transporte a partir de la función de costos de la empresa transportista, siempre que el transporte se encuentre explícitamente identificado como uno de los factores de producción.

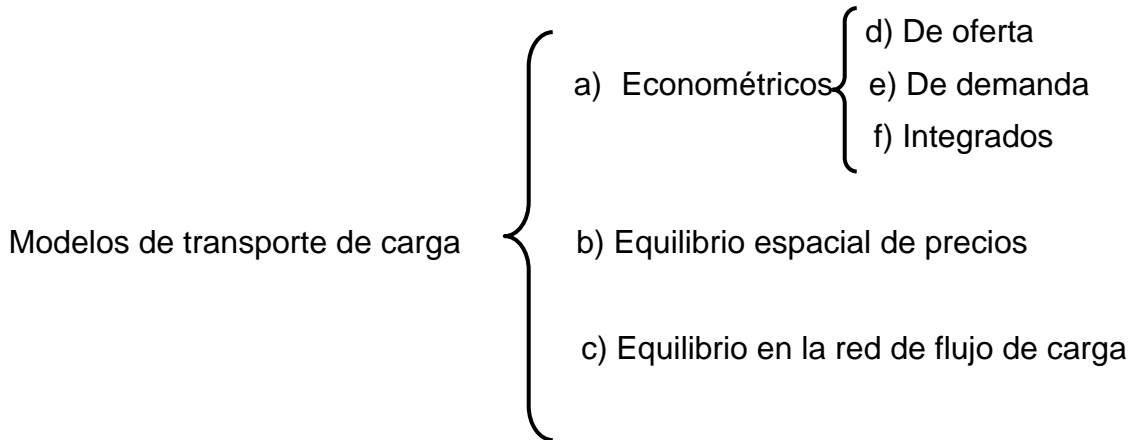
Respecto a los modelos desagregados, los de base conductual se enfocan a la elección del modo de transporte que hacen los cargadores y embarcadores en su intento de maximizar la utilidad de las operaciones; mientras que los modelos con base en inventarios adoptan el punto de vista del gerente de almacenamiento, que trata de optimizar la utilidad de la empresa al escoger las características del transporte a utilizar, bajo las condiciones impuestas por la política de producción e inventario de la empresa (Winston, 1983)

Regan y Garrido (2001), en un análisis conjunto de la demanda de transporte de carga y las reacciones del embarcador, proponen una clasificación de los modelos de demanda con un enfoque geográfico:



La clasificación de transporte de carga inter urbano es semejante a la que propone Winston, primero con los modelos agregados y desagregados, y luego con los de base conductual y de inventarios; sin embargo, el criterio geográfico propuesto separa de manera casi natural tanto a los tomadores de decisiones como a las fuerzas subyacentes que movilizan la carga dentro de cada categoría, en virtud de los rasgos totalmente distintos de cada tipo de movimiento. Por otra parte, Regan y Garrido mismos (2001, p. 187) hacen notar la potencial limitación que tiene este enfoque geográfico, debido al fenómeno de la globalización que desde finales del siglo XX se ha estado extendiendo en el mundo.

Otros estudios más generales que los de demanda también han surgido, como es el caso de la planeación del transporte de carga. En un tratamiento de los flujos de carga interurbanos en los Estados Unidos, Harker (1987) clasifica a los modelos de transporte de carga como sigue:



De acuerdo con Harker, los modelos econométricos se basan en el análisis de series de tiempo o datos de corte seccional, que representan al sistema de carga por medio de las relaciones y correlaciones entre sus variables. Los modelos de oferta se enfocan a las características de la producción y a los costos de la actividad del transporte de carga, más que en los pronósticos de servicios de transporte. Los modelos de demanda se concentran en la solicitud de los servicios de transporte de carga; en tanto que los modelos integrados consideran la demanda y la oferta de servicios de carga, a fin de estimar un equilibrio entre ellas.

El modelo de equilibrio espacial de precios utiliza una red que representa el sistema de transporte de carga, donde los nodos representan áreas productivas, áreas consumidoras, o puntos de transbordo. Para las áreas de producción y de consumo se tienen funciones de oferta y de demanda; y el modelo representa las interacciones entre los productores, los consumidores y los embarcadores. Los transportistas no están representados explícitamente en el modelo, pero se tienen funciones de costo del servicio de transporte.

Este modelo estima los movimientos de carga a partir de los intercambios de productos entre los embarcadores que intentan satisfacer la demanda. Este proceso de intercambios se mantiene hasta que se alcanza la siguiente condición de equilibrio para cualquier carga que se esté moviendo:

$$\text{Precio en el destino} = \text{precio en el origen} + \text{costo de transporte}$$

Este concepto de equilibrio espacial de precios ha demostrado ser de gran utilidad en el pronóstico de flujos interregionales de carga (Harker, 1987).

Los modelos de equilibrio en redes de flujo de carga también usan una red para representar al sistema de transporte, enfocando la atención en las interacciones entre los embarcadores, los transportistas y los transportistas potenciales. Los movimientos de carga se originan en las decisiones de los embarcadores, guiados por los *principios de optimización de Wardrop*. Algunos modelos se orientan hacia el llamado *equilibrio del usuario*, suponiendo que los embarcadores (o los transportistas) mueven sus carga en un ambiente no-cooperativo tratando cada quien de minimizar sus propios costos de operación. Otros modelos se orientan

hacia el llamado *equilibrio del sistema*, donde el objetivo es más bien normativo, tratando de minimizar el costo total del transporte de carga realizado en la red.

En algunos de estos modelos, la demanda se ha considerado fija en ciertos nodos; pero en otros casos se han utilizado funciones de demanda variables, permitiendo así un tratamiento más general. Modelos de equilibrio en redes de flujo para movimientos de carga a nivel nacional se han utilizado para representar los flujos de carga multi modales y de múltiples productos (Harker, 1987)

Las categorizaciones presentadas, si bien no son una revisión exhaustiva de los modelos de carga, permiten sin embargo mostrar la diversidad encontrada en la modelación del transporte de carga, y la dificultad de hallar una taxonomía que sea de aceptación universal. Los principales problemas que estos modelos abordan son:

- El reparto del tráfico entre modos de transporte (modelos simples)
- La elección del modo de transporte de carga:
  - a) Bajo un esquema de maximizar la utilidad
  - b) Bajo el esquema de maximizar el beneficio de la empresa, respetando su programa de producción-inventario
- La demanda derivada de los servicios de transporte a través de la función de costos de la empresa, y condiciones optimales de primer orden adecuadas
- El concepto de equilibrio:
  - a) Como equilibrio oferta-demanda que determina los orígenes y los destinos para la carga,
  - b) Como equilibrio espacial de precios que determina los flujos de carga, y
  - c) Como equilibrio espacial en una red suponiendo los principios de optimalidad de Wardrop (equilibrio del usuario o equilibrio del sistema)

Harker (1987) discute de modo muy conciso las ventajas y desventajas de cada tipo de modelo.

Así, los modelos econométricos y también los de tipo agregado/desagregado, trabajan con datos básicos de trabajo, capital, energía, o niveles de servicio para obtener buenas estimaciones de la demanda, del costo o de las funciones de producción en la actividad del transporte de carga. Las relaciones entre las variables del modelo, así como las correlaciones que resultan de estos modelos permiten estimar los impactos potenciales de distintos escenarios o políticas de transporte que se pretenda aplicar.

Sin embargo, los modelos econométricos no tienen una descripción detallada de la red usada para el transporte, y no toman en cuenta la complejidad de los

movimientos reales del transporte de carga, que enfrentan elecciones de ruta, congestión, o costos percibidos.

En los modelos de equilibrio espacial de precios y de equilibrio en redes de flujo, se utiliza una red que representa el sistema de transporte. La red subyacente describe la infraestructura de transporte por medio de un conjunto de nodos y de arcos uniendo estos nodos. Asociando parámetros a los nodos se puede representar oferta o demanda de productos, o capacidades de almacenamiento, mientras que en los arcos los parámetros pueden representar nivel de servicio, tiempo de tránsito, o costo generalizado de cruzar por esos arcos.

Los modelos de redes de flujo, fácilmente calculan el valor del flujo de equilibrio en la red. Mientras que el modelo de equilibrio espacial de precios se enfoca en la diferencia del precio de los productos entre orígenes y destinos, los modelos de equilibrio de flujo se centran en la asignación de flujos a los arcos, siguiendo los principios de optimalidad de Wardrop. De esta manera, estos modelos pueden tratar los problemas de selección de ruta y de costos percibidos en redes de transporte con congestión.

Como contraparte, la red de caminos fija que se usa en estos modelos, no permite tratar con cambios dinámicos en la actividad del transporte de carga, como por ejemplo, la construcción de nuevos caminos, la clausura de tramos carreteros, o la sustitución de insumos como capital, trabajo y energía.

Las clasificaciones de modelos ya mostradas enfatizan diversos aspectos de la demanda de transporte de carga, o algún concepto de equilibrio donde el análisis económico juega el papel central. Desde un punto de vista sistémico del transporte, que trata de captar las interacciones entre las partes que lo integran, en este trabajo se propone un criterio de clasificación que surge de tres preguntas básicas cuyas respuestas esclarecen la dinámica de los movimientos de carga.

### **1) ¿Qué carga es la que se mueve?**

- ¿Se cuantifica en toneladas, en metros cúbicos, o por valor?
- ¿Dónde se genera, a dónde es atraída, y cuánto se demanda?
- ¿Cuáles son las características de la carga?
  - ¿Sólida, líquida, gas, contenerizada, tipo de embalaje, a granel, refrigerada, perecedera, peligrosa, densidad económica (\$/t)?
  - ¿Cuál es el tamaño y frecuencia de los embarques?
  - ¿Cuál es la sensibilidad de la distribución al costo de transporte?
- ¿Quiénes son las partes interesadas, o los actores involucrados?

Estas preguntas se relacionan con la *demandas del transporte de carga*.

### **2) ¿Por dónde se mueve la carga?**

- ¿Qué rutas y criterios de selección de ruta se usan?

- ¿Qué peajes o impuestos se pagan, y cuál es el costo de operar los vehículos
- ¿Cuál es la calidad del camino (congestionamiento, rugosidad, pendiente, accesibilidad)?
- ¿Quiénes son las partes interesadas, o los actores involucrados?

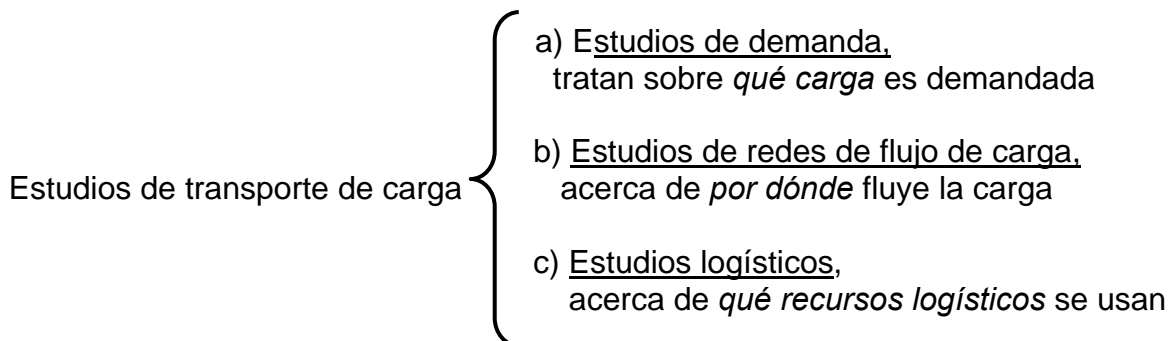
Estas preguntas se relacionan con los detalles de la *red* sobre la que se efectúa el movimiento de carga.

### 3) ¿Qué logística está involucrada?

- ¿Cuál es la composición de la flota: el número de vehículos y sus tipos?
- ¿Qué clase de ruteo vehicular, programación o administración de flota se utiliza?
- ¿Qué grado de consolidación en colecta y distribución o en ruteo es usado?
- ¿Qué reglas empíricas o heurísticas se utilizan?
- ¿Cuál es el nivel de servicio?
- ¿Qué apoyos de comunicaciones y técnicas de transporte inteligente se usan?
- ¿Quiénes son las partes interesadas, o los actores involucrados?

Estas preguntas se relacionan con los recursos *logísticos* empleados en el transporte de carga.

Este esquema está inspirado en el paradigma de las “tres preguntas de la asignación de recursos” que se utilizan en economía para abordar la cuestión de la escasez de los recursos, y que son: *¿Qué producir?*; *¿Cómo producirlo?*; y *¿Para quién producirlo?* (Samuelson y Nordhaus, 1989; AmosWEB, 2003). Así, la siguiente clasificación resume este punto de vista.



Este criterio que se propone no se basa ni en el tipo de datos empleado en los modelos (agregado/desagregado), ni en el método de cálculo utilizado (p ej, como en la estimación de la demanda inversa a partir de una función de producción), ni tampoco en el paradigma de las cuatro etapas de la planeación del transporte; aun

cuando cada una de estas etapas puede entrar en la clasificación; por ejemplo, tratando las etapas de generación de viajes, distribución y selección de modo se podrían tomar como estudios de demanda, y a su vez la etapa de asignación como estudio de redes de flujo.

Este criterio sin embargo, no cubre la totalidad de los modelos; así por ejemplo, en el equilibrio espacial de precios se tiene una componente principal en la representación de la red, a la vez que se modela el equilibrio de los flujos demandados entre orígenes y destinos, por lo que la clasificación podría tenerse tanto en los modelos de demanda como en los de redes de flujo.

De particular importancia son los modelos logísticos, que son estudios que han ganado terreno en las últimas décadas. La tabla 2.3 muestra los resultados de una búsqueda de los términos *logistics* (*logística*) y *supply chain* (*cadena de suministro*) en la base de datos TRIS Online (TRB, 2005) realizada en julio de 2005, donde se aprecia el constante incremento en el número de trabajos relacionados con logística y cadena de suministro, a partir de la década de los años 1980.

**Tabla 2.3**  
**Búsqueda de los términos “logística” y “cadena de suministro” en la base de datos TRIS Online (TRB, 2005)**

Periodo	Término: LOGISTICS		Término: SUPPLY CHAIN	
	Número	Prom. anual	Número	Prom. anual
1915-1960	0	0	0	0
1961-1970	13	1,3	0	0,0
1971-1980	230	23,0	0	0,0
1981-1990	1.033	103,3	4	0,4
1991-2000	3.246	324,6	326	32,6
2001- Jul/2005	2.364	515,8*	681	148,6
* Parte proporcional a jul/05				

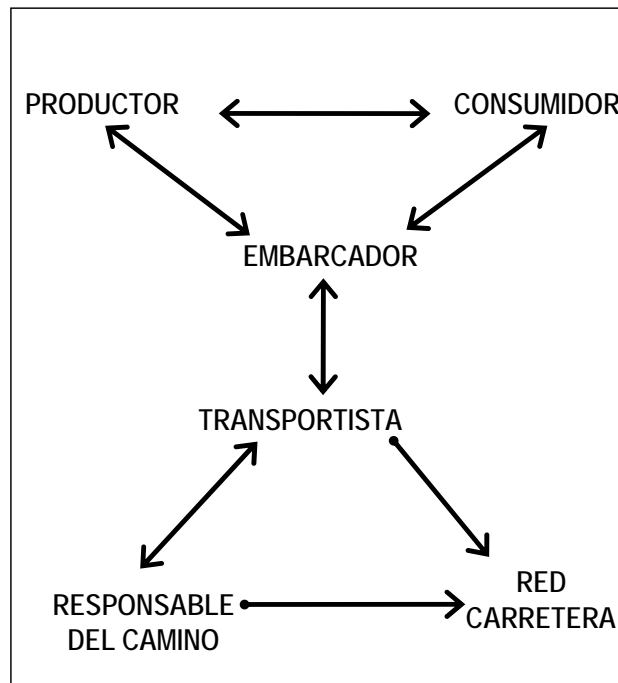
Muchos de estos trabajos se han basado en estudios y casos tratados en Europa y Norteamérica, reportando generalmente resultados muy exitosos en la práctica; sin embargo, aún está pendiente mucho trabajo por hacer a fin de tener una amplia facilidad de transferirse al resto de los países, y aprovechar estas experiencias.

## 2.3 Un enfoque sistémico

Como se ha mencionado, la diversidad de actores que intervienen en la generación del transporte de carga de modo simultáneo y con diferentes objetivos hace que las tareas de modelación de esta actividad difieran notablemente de su contraparte en el modelado del transporte de pasajeros.

Una manera de abordar la problemática del control de tráfico de carga con un enfoque de ingeniería es con el enfoque de sistemas, considerando al autotransporte de carga como un sistema formado por componentes que interactúan entre sí para el objetivo común de mover la carga de sus orígenes a sus destinos.

Un antecedente de esta representación de interacciones entre las partes del sistema de transporte, aunque siguiendo un punto de vista económico, es la que da Harker (1987), que muestra un marco general para explicar la demanda del transporte de carga identificando a los principales actores que intervienen, tal como se ilustra en la fig 2.2.



**Figura 2.2**

**Relaciones entre actores y elementos del transporte de carga (con base en Harker, 1987)**

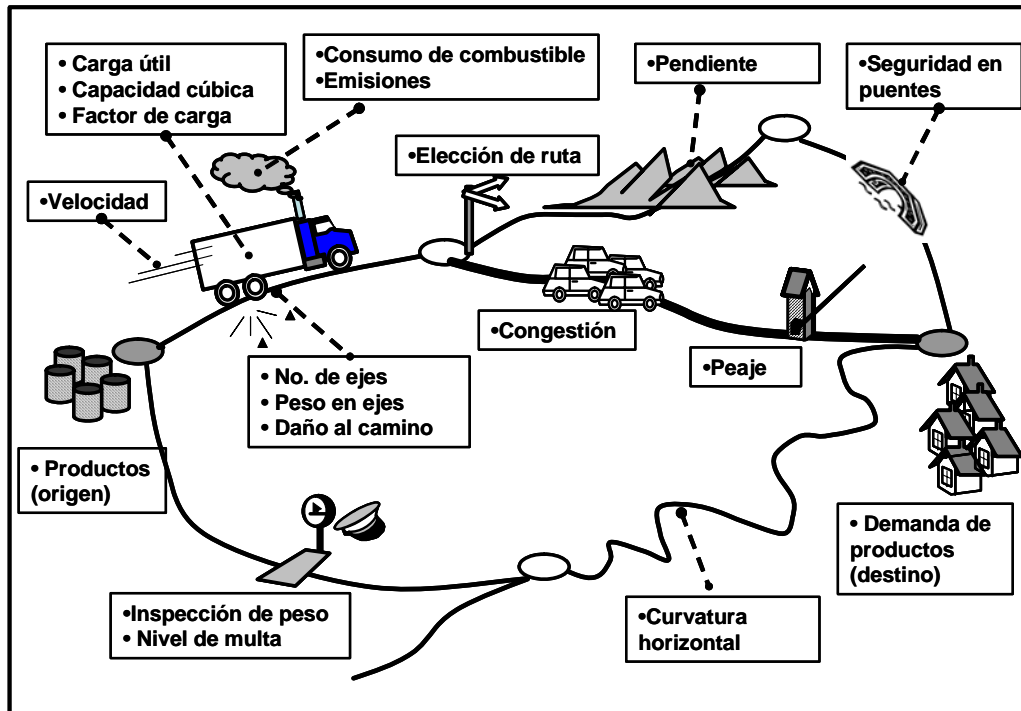
En la fig 2.2 se observa cómo la interacción entre productores y consumidores genera una demanda derivada de transporte, que motiva al embarcador a hacer la colecta y los envíos requeridos; para lo cual se apoya en los servicios del transportista. Éste a su vez se relaciona con el responsable del camino exigiendo la provisión de infraestructura, la cual utiliza para realizar el transporte de carga en sí. El responsable del camino por su parte, enfrenta el problema de proveer y mantener la infraestructura y a fin de racionalizar su uso; genera también las regulaciones necesarias para controlar a los usuarios.

Los diversos actores se relacionan por conceptos económicos que guían su conducta; así por ejemplo, productores, consumidores y embarcadores por los precios de mercado de los productos demandados y ofrecidos; y de los servicios de transporte; embarcadores y transportistas por precios de mercado; fletes y

niveles de servicio; los transportistas y el responsable del camino; por peajes, regulaciones e impuestos al combustible.

Si bien el diagrama mostrado hace énfasis en las relaciones económicas de la actividad de mover carga, ayuda a aclarar qué actores están involucrados en la generación del tráfico; cuáles son sus parámetros de desempeño (p ej, precios de mercado, peajes, regulaciones); y quiénes son sus contrapartes que los limitan (el responsable del camino que impone regulaciones, los embarcadores que siguen las fluctuaciones de la oferta y la demanda, etc). Esta observación antecede a la adopción de un enfoque sistémico más amplio del transporte de carga, donde el punto de vista sea el del responsable del camino.

Un punto de partida de este enfoque sistémico es un diagrama de *imagen enriquecida* (Checkland, 1999) donde el sistema de autotransporte de carga se representa como un todo, y los componentes son agregados o excluidos según la importancia que tengan para los propósitos de modelación del sistema. Este diagrama se muestra en la fig 2.3.



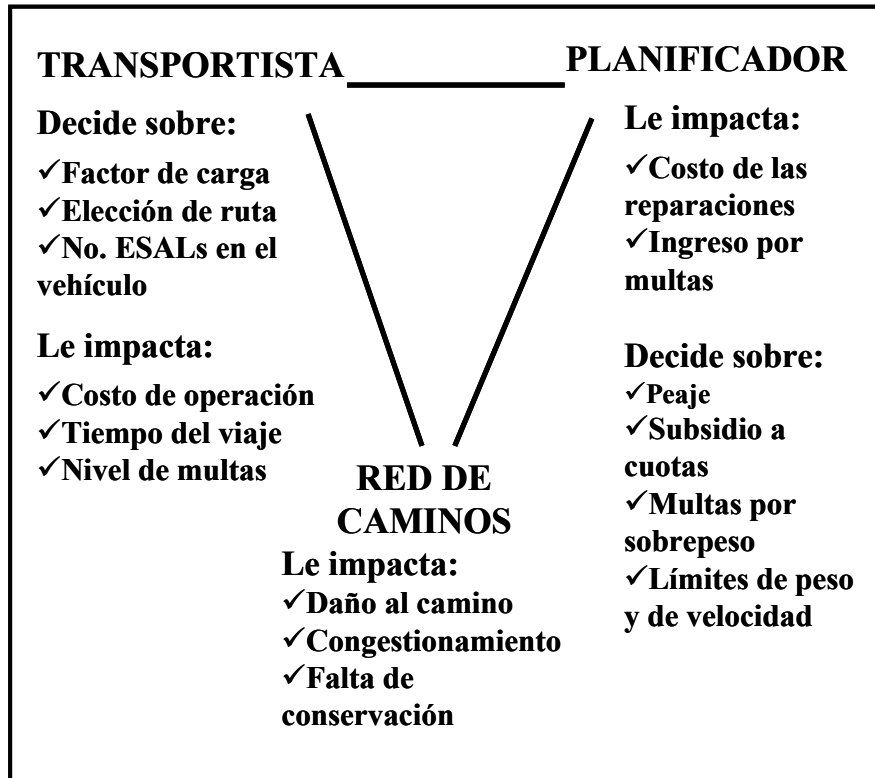
**Figura 2.3**  
**Diagrama de “imagen enriquecida” del sistema de transporte de carga**

El diagrama de imagen enriquecida permite identificar los elementos relevantes al objetivo de modelación, así como las variables numéricas que naturalmente se prestan para medir el desempeño de cada componente. De esta manera, el diagrama sugiere la interacción que surge entre los transportistas que utilizan la infraestructura carretera para movilizar las cargas, y el responsable del camino que provee la infraestructura y el mantenimiento; así como los parámetros que



cada uno controla en su respectiva actividad y los correspondientes impactos que tienen que afrontar.

Partiendo de la imagen enriquecida del transporte de carga, la fig 2.4 muestra tres elementos del sistema relevantes en el control de tráfico : el usuario del camino (los transportistas); la infraestructura; y el responsable de la carretera, ligados junto con las variables que controlan y los impactos que les afectan.



**Figura 2.4**  
**Componentes y parámetros del sistema de transporte de carga**

La representación de la fig 2.4 da pauta para modelar las interacciones de los actores y elementos físicos involucrados en la cuestión del tráfico carretero de carga, y buscar medidas de control del tráfico que permitan el desarrollo de la actividad del autotransporte de carga en un marco de uso racional de la infraestructura, que permita al responsable de ésta un desempeño adecuado así como una mayor cobertura en extensión y en calidad en la red carretera.

A fin de puntualizar sobre la actividad propia del responsable del camino, el capítulo siguiente examina la cuestión del mantenimiento vial, que es una actividad crucial en el desempeño de este actor, continuando en los siguientes capítulos con el modelado del control de tráfico de carga carretero.



### 3 La cuestión del mantenimiento carretero

Al finalizar el siglo XX, el autotransporte se ha manifestado como la forma dominante en los flujos terrestres de carga en México y en muchos países del mundo industrializado. A la vez que la red carretera pavimentada se ha extendido notablemente en la década de los años 90 y los primeros de los años 2000; el número de vehículos de carga registrado también ha crecido; y el número de toneladas-kilómetro en el autotransporte se ha mantenido al alza. Las figuras 3.1 a 3.3 muestran estas tendencias.

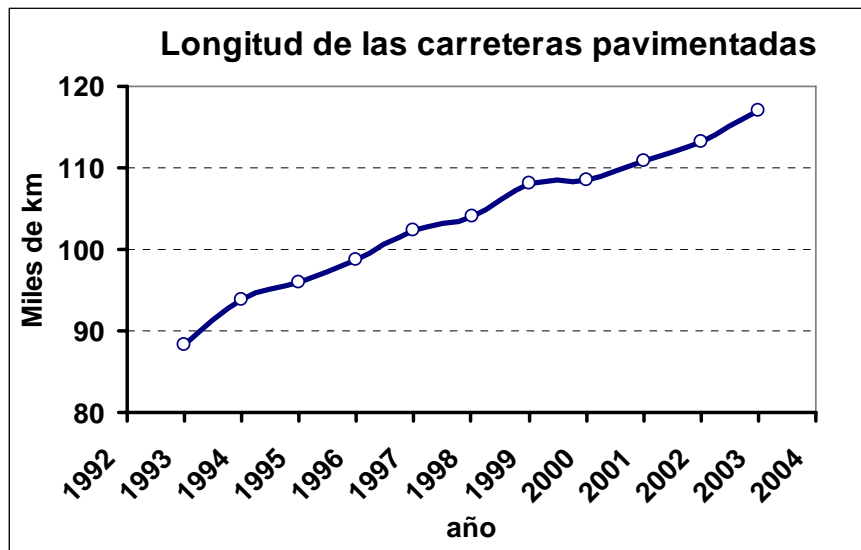


Figura 3.1  
Carreteras pavimentadas 1993 – 2003 (SCT, 2005)

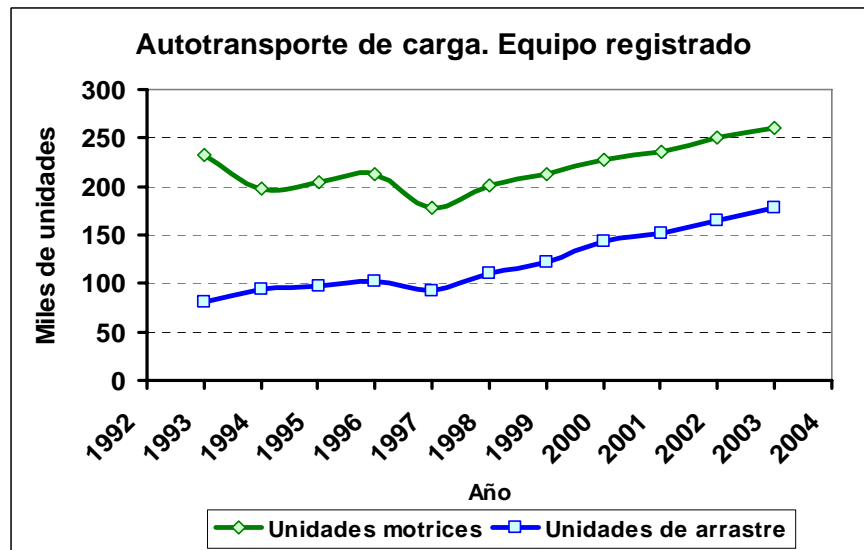


Figura 3.2  
Equipo de autotransporte registrado 1993 – 2003. (SCT, 2005)

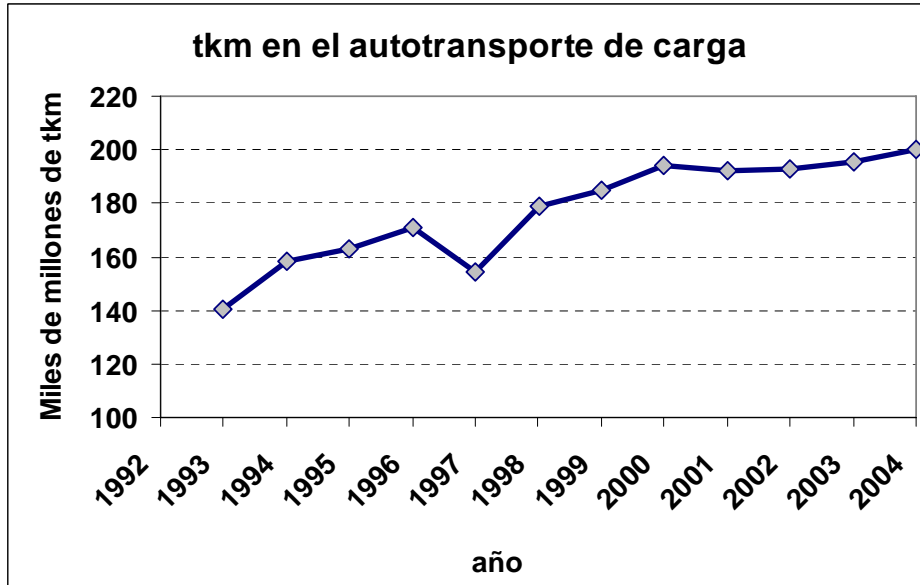


Figura 3.3

Flujo de carga carretero 1993 – 2004 en tkm (SCT, 2005)

Una apreciación amplia sobre la presencia de estos vehículos en la red carretera pavimentada se obtiene observando la densidad promedio de vehículos por kilómetro de carretera disponible, que indica una tendencia también creciente, como se ve en la fig 3.4.

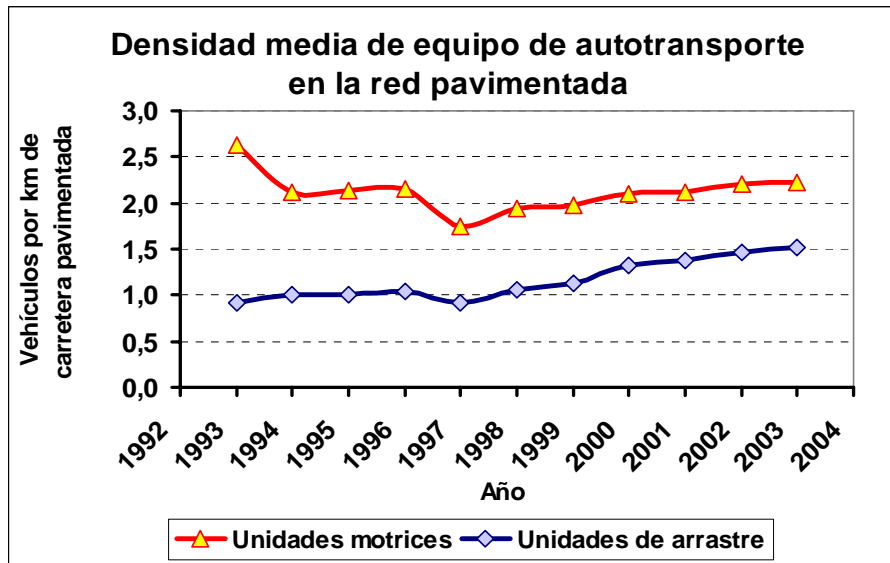


Figura 3.4

Densidad promedio de vehículos de carga en la red carretera pavimentada (con base en datos de SCT, 2005)

Las gráficas mostradas revelan que en estos años, el mantenimiento carretero ha tenido que tomar en cuenta una red cada vez más extensa donde un número creciente de vehículos producen mayores niveles de toneladas-kilómetro cada año. Esta circunstancia, combinada con la crónica escasez de los presupuestos

gubernamentales dedicados a la conservación de la red carretera federal, plantea la necesidad de racionalizar el uso de los recursos dedicados al mantenimiento carretero, buscando medidas que permitan mejorar su aplicación y su cobertura en la red carretera.

### 3.1 Externalidades y tarificación vial (*road pricing*)

El deterioro del camino causado por el tráfico de vehículos de carga es un costo que los transportistas generan, pero que no consideran en su operación; este costo más bien aparece dentro de las obligaciones de mantenimiento del responsable del camino. En términos económicos esa situación se conoce como *externalidad*; es decir, la generación de un costo (o beneficio) originado en una actividad, y que no recae sobre aquél que la desarrolla. El deterioro del camino derivado de la actividad del transporte de carga es una *externalidad negativa* (un costo), que el responsable del camino tiene que enfrentar, dado el compromiso que este actor tiene de conservar la infraestructura en condiciones aceptables de operación.

Si bien es cierto que los transportistas pagan diversos impuestos en su actividad, como son el impuesto al combustible, los permisos, las placas, etc; también es cierto que la recaudación de estos impuestos no está “etiquetada” para ser utilizados sólo en las necesidades del sector transporte; sino que van a un destino común con otros impuestos, y finalmente se aplican para atender diversas necesidades sociales como son la educación, la salud, la seguridad nacional, etc. De esta manera, la conservación de los caminos que no tienen peaje, y que forman la parte más extensa de la red carretera, depende totalmente de la asignación de recursos determinada por el proceso anual de conformación del presupuesto de egresos de la Federación, bajo criterios que difícilmente coinciden con la problemática real de conservación de la red.

La situación que se ha descrito se presenta en muchos países, y es lo que ha dado lugar a la endémica escasez presupuestal para la conservación carretera. Una medida correctiva que de inmediato se sugiere es que los operadores *absorban* los costos de deterioro que ocasiona su actividad dentro de sus costos de operación, lo que en la práctica significa *tarificar* el uso de la infraestructura.

La tarificación de la infraestructura de transporte (*road pricing*, en la literatura inglesa) no es una idea muy reciente. Iniciativas para promover la aplicación de peaje a usuarios de la carretera se propusieron en 1998 en el Libro Blanco Europeo sobre el tema del pago justo por el uso de la infraestructura (European Comisión, 1998, p.1). En la propuesta de enmienda de la Directiva 1999/62/EC de la Comisión Europea para cargos por uso de la infraestructura a camiones de carga se reconoce que:

*“La Edad Media fue la única época en la que los dueños de los caminos estratégicos podían cargar ‘cuotas’ sin dar ningún valor añadido o algún otro servicio a cambio.*

*Los cargos por el uso de la infraestructura por sí mismos no pueden remediar todos los desequilibrios del mercado de transporte. Sin embargo, el peaje proporcionará un marco de referencia necesario para que los usuarios de la carretera tomen decisiones racionales que consideren todos los parámetros que constituyen los costos del transporte en cada modo” (European Commission, 2003, p.3).*

Este enfoque que apunta hacia la planificación de los caminos de peaje que hoy en día se practica en varios países había sido señalada ya con gran claridad en el siglo XIX por el ingeniero británico John Loudon McAdam, un pionero en la tecnología de construcción de caminos (Cebon, 1993, p.5; Microsoft Encarta, 2004), quien en 1822 escribió acerca de los factores fundamentales que afectan a la construcción y el mantenimiento de los caminos en la Gran Bretaña:

*“Las carretas y los coches con ruedas de forma cilíndrica y chumaceras verticales, circulando sobre llantas de cinco a seis pulgadas de ancho, no pueden dañar a un camino bien construido, a las reducidas velocidades con la que semejantes carruajes viajan; por lo menos, en ninguna proporción más allá del peaje que pagan. Por el contrario, ciertamente, que las diligencias, con el sistema que utilizan para llevar cargamentos, y la velocidad a la que viajan, sobre ruedas de muy poco ancho, deterioran el camino en una proporción mucho mayor que la compensación que se obtiene del peaje que pagan.*

*...Cuando la Legislatura haya proporcionado los medios de poner todos los caminos del Reino Unido en la mejor de las condiciones para dar cabida a la agricultura y al comercio del país, naturalmente considerará los medios más apropiados de protegerlos del daño, o para redimir los fondos que cubrirán los efectos de la utilización, que resulta inevitable, al imponer peajes en una proporción justa y equitativa a los carruajes que ocasionan tal deterioro.” (McAdam, 1822, pp. 14-15)*

La aplicación de cargos por el uso de la infraestructura, sin embargo, no es una medida fácil de planear e implantar. Para que una política de administración de carreteras resulte viable, debe tomar en cuenta los diversos intereses del gobierno federal, los gobiernos estatales y municipales; los usuarios del camino; y los constructores y operadores de autopistas. Las instancias gubernamentales enfrentan grandes presiones para proveer la infraestructura con especificaciones adecuadas para el tránsito vehicular y a un tiempo, manteniendo niveles impositivos aceptables. Equilibrar estos objetivos no resulta nada sencillo. Por el lado del gasto, aun cuando se contara con fondos dedicados a la conservación de la infraestructura, existen restricciones políticas y presupuestales en la práctica que pueden limitar la eficiencia de la aplicación de los recursos. Por el lado del ingreso, el impuesto a los combustibles parece ser la forma dominante de captación de ingresos, la cual sin embargo, está sujeta a las fluctuaciones que los aumentos de precios del petróleo reflejan en el consumo de combustible (Small, Winston y Evans, 1989). Además de esto, el costo político de aumentar el precio de los combustibles para mejorar la captación de ingresos dedicados a la

conservación vial, puede resultar un factor difícil de superar por los tomadores de decisiones gubernamentales.

Es por las razones descritas, que la búsqueda de medidas alternas que contribuyan a mejorar la administración de los recursos dedicados a la conservación carretera, sin tener que aplicar nuevos impuestos, nuevos peajes, o alzas a insumos del transporte, resulta pertinente y de interés.

### 3.2 Experiencias recientes en tarificación vial

La tarificación de la infraestructura ha sido un tema central en las discusiones de políticas de transporte a lo largo de la conformación del gran proyecto de la Unión Europea. Luego de prolongadas discusiones sobre la aplicación de cargos a los camiones de carga, el Parlamento Europeo aprobó en 1999 la llamada “Directiva de la Euroviñeta”, un esquema de tarificación diseñado para aplicar cargos escalonados de tarifas de acuerdo con el impacto provocado por los camiones.

La Directiva de la Euroviñeta se diseñó bajo dos principios básicos:

- **Principio de asignación:** Los recursos provenientes del peaje y de los derechos del uso deben utilizarse en beneficio del mantenimiento de la infraestructura vial sobre la cual se aplican estos peajes, así como en beneficio del sector transporte en su conjunto, tomando en consideración el desarrollo equilibrado de las redes de transporte.
- **Designación de una autoridad de la infraestructura vial, independiente y nacional.** Dicha autoridad debe vigilar el cumplimiento estricto del principio de asignación.

Conforme a lo anterior, esta autoridad independiente de la infraestructura vial, tendría como misión:

- Controlar el funcionamiento del sistema de peajes y/o de los derechos de uso, de manera que se garantice la transparencia y la no discriminación entre los operadores.
- Sin perjuicio de la autonomía de los concesionarios privados, la autoridad independiente debe supervisar que los recursos originados en los peajes y los derechos de uso de la infraestructura del transporte se apliquen a proyectos durables del sector transporte.
- Promover sinergias en el financiamiento para lograr una coordinación entre las diferentes fuentes de financiamiento para las infraestructuras del transporte (Allemand, F., 2005).

Este esquema de cargos a usuarios del camino clasificó a los vehículos de carga en tres estándares: EURO-0, EURO-I y EURO-II en atención al grado del impacto que el vehículo causa al medio ambiente y a la infraestructura, de modo que se cargara menos a los vehículos menos contaminantes; asimismo los vehículos menos pesados tendrían cargos menores. La tabla 3.1 muestra los cargos anuales máximos propuestos para los camiones de tres ejes y de cuatro ejes, con vigencia a partir del 01/jul/2001.

**Tabla 3.1**  
**Cargos a camiones rígidos en la CE (European Commission, 1993)**

**CARGO ANUAL. EUROVIÑETA (Euros)**

<b>Tipos de combustión/peso</b>	<b>Máximo 3 ejes</b>	<b>Mínimo 4 ejes</b>
<b>EURO-0</b>	<b>960</b>	<b>1.550</b>
<b>EURO-I</b>	<b>850</b>	<b>1.400</b>
<b>EURO-II, y menos contaminante</b>	<b>750</b>	<b>1.250</b>

La estratégica localización geográfica de Suiza (que no pertenece a la Unión Europea) en la parte central de la Red Transeuropea y su firme posición de conservar el ambiente alpino, hizo que durante mucho tiempo se impidiera que camiones cargados con más de 28 toneladas utilizaran las carreteras suizas. Negociaciones de la Unión Europea con Suiza, finalmente relajaron esa política dando entrada a camiones con mayores PBV, siempre y cuando compensaran su impacto por medio de un sistema de peajes desarrollado por las autoridades suizas (European Comisión, 1993).

En enero de 2001 Suiza puso en marcha el Sistema de Cuotas a Camiones de Carga (*Heavy Vehicle Fee system*) (HVF) aplicable a cualquier vehículo de carga con PBV de más de 3.5 toneladas y máximo de 34; esto incluyó tanto a camiones suizos como extranjeros. Se espera que en el futuro el límite de peso autorizado en Suiza alcance las 40 toneladas que se manejan en los movimientos de carga dentro de la Unión Europea. *Las cuotas se calculan por tonelada-kilómetro*, y están diferenciadas en cinco niveles correspondientes a la nueva clasificación europea: EURO 0, EURO 1, EURO 2, EURO 3 y EURO 4. En su edición 2005, la Administración Federal de Aduanas suiza publicó las tarifas aplicables a partir del 01/ene/2005 para todos los vehículos de carga que circulen en dicho país así como en el principado de Liechtenstein. La tabla 3.2 muestra el esquema tarifario, y un ejemplo de cálculo ilustrativo.



**Tabla 3.2**  
**Tarifa suiza para vehículos de carga en 2005 (AFD, 2005)**

<b>Tasas impositivas a camiones de carga en el sistema carretero suizo</b> (en francos suizos)		
A partir del 1o. de enero 2005		
<b>Categoría vehicular</b>	<b>Categorías Euro</b>	<b>Tarifa</b>
I	Euro 1, 0 y anteriores	2.88 ct. / tkm
II	Euro 2	2.52 ct. / tkm
III	Euro 3, 4 y ulteriores	2.15 ct. / tkm

Ejemplo de cálculo:

Peso bruto vehicular	18 t
Tarifa según categoría	2.52 ct./tkm
Kilómetros de recorrido	100 km
Total	45fr. 35ct

**Cálculo: 18 x 2.52 x 100 = 4536 ct. = 45fr. 35ct**

Consistentemente con la política de cargos a usuarios de carreteras de la Comisión Europea en relación con una mayor diferenciación en las cuotas de autopistas, Alemania se preparó para introducir *un esquema tarifario basado en la distancia recorrida*, aplicable a camiones con PBV de 12 toneladas en adelante; programado para arrancar en el verano de 2003. Este sistema de cuotas reemplazó al esquema de la Euroviñeta en Alemania, y parece ser que es el primer sistema de cobro completamente electrónico (FTA online, 2003; Transport Logistic, 2002).

Los vehículos se clasifican en categorías "S", según sus niveles de emisiones, desde S1 (menos contaminante) hasta S5 (más contaminante), además de la categoría EEV (Enhanced Environmental Vehicle) (Vehículo Ambientalmente Mejorado) de camiones con la tecnología más reciente para reducir emisiones, a fin de motivar a los propietarios a cambiar sus vehículos por modelos con emisiones menos dañinas al ambiente.

Las categorías de peajes A, B y C cobran más a los vehículos con motores más contaminantes, y se tiene previsto el envejecimiento natural de los camiones para ajustar el nivel de cobro al posible impacto ambiental de éstos.

La tabla 3.3 contiene la clasificación vehicular del sistema de peaje alemán en el horizonte 2006 a 2009, y en la 3.4 se muestran los cargos de peaje aplicables en este esquema tarifario.

**Tabla 3.3**  
**Clasificación de los camiones en el sistema de peaje alemán (Toll Collect GmbH, 2005)**

CATEGORÍAS VEHICULARES EN EL SISTEMA DE PEAJE ALEMÁN			
	Categoría A	Categoría B	Categoría C
Hasta el 30 de septiembre de 2006	S4, S5 y EEV Categoría 1	S3 y S2	S1 y los vehículos que, según sus emisiones, no pertenecen a ninguna categoría
Desde el 1 de octubre de 2006 hasta el 30 de septiembre de 2009	S5 y EEV categoría 1	S4 y S3	S2, S1 y los vehículos que, según sus emisiones, no pertenecen a ninguna categoría
A partir del 1 de octubre de 2009	EEV categoría 1	S5 y S4	S3, S2, S1 y los vehículos que, según sus emisiones, no pertenecen a ninguna categoría

**Tabla 3.4**  
**Tarifa alemana para vehículos de carga ( Toll Collect GmbH, 2005)**

IMPORTE DEL PEAJE POR KILOMETRO EN ALEMANIA (Euros)			
Número de ejes del vehículo / de la combinación de vehículos	Categoría A	Categoría B	Categoría C
Hasta tres ejes, norma europea ( eje tándem cuenta como dos ejes)	€ 0.09	€0.11	€0.13
Cuatro o más ejes	€ 0.10	€0.12	€0.14

En línea con la política de involucrar tanto como sea posible a los usuarios de la red carretera de altas especificaciones en un sistema equitativo de costos de mantenimiento compartidos, Austria también ha desarrollado un sistema de peaje que empezó a funcionar en enero de 2004. Todos los vehículos con pesos brutos de 3,5 toneladas o más, son sujetos del peaje en los 2.000 kilómetros de la red de autopistas de altas especificaciones, bajo la responsabilidad de la empresa estatal austriaca ASFINAG (Autobahnen- und Schnellstraßen- Finanzierungs- Aktiengesellschaft, *Financiamiento de Autopistas y Vías Rápidas*, S.A.). La tabla 3.5 muestra los peajes aplicables en el sistema austriaco.

En los cruces de las secciones alpinas, que tienen mayores costos de mantenimiento y ya manejaban cuotas, se fijaron cargos mayores. Un aspecto interesante de la organización del peaje austriaco es que los ingresos por cuotas están claramente etiquetados para destinarlos a construcción y mantenimiento de la red de peaje, y también para cubrir las obligaciones financieras de las actividades de construcción iniciales de la red carretera (ASFINAG, 2005).

**Tabla 3.5**  
**Tarifa austriaca para camiones de carga (ASFiNAG, 2005)**

IMPORTE DEL PEAJE POR KILOMETRO EN AUSTRIA (Euros)			
	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4
<b>Ejes</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4 o más</b>
<b>Cuota en €/ km</b>	<b>0,130</b>	<b>0,182</b>	<b>0,273</b>
<b>Relación</b>	<b>1</b>	<b>1,4</b>	<b>2,1</b>

En los Estados Unidos, la idea de aplicar cargos por distancia recorrida también empieza a considerarse, en virtud de la tendencia decreciente que la recaudación de impuestos a combustibles ha tenido en ese país en los últimos años; en buena medida debido a la aparición de motores mejor diseñados, y al uso de vehículos híbridos que consumen menos gasolina.

En el estado de California, por ejemplo, la recaudación por impuesto a los combustibles se redujo un 8% en términos reales, en el periodo 1998 a 2005; mientras que el millaje total recorrido en sus carreteras, aumentó un 16% (Lockridge, D., 2005). En noviembre de 2004 las autoridades californianas empezaron a discutir la posibilidad de cambiar el impuesto estatal a la gasolina vigente (US\$0,18 por galón) por uno basado en las millas recorridas por los vehículos. El cargo incluiría una parte variable para encarecer el uso de las carreteras en las horas pico, a fin de aliviar el congestionamiento durante ese periodo (Green Car Congress, 2004).

Con un enfoque similar, el Departamento de Transporte de Oregon (Oregon Department of Transportation, ODOT) publicó en 2004, en su página web las reflexiones de su Grupo de Trabajo para Peajes (Road User Fee Task Force), indicando la misma problemática de reducciones en los ingresos por impuestos al combustible, y la necesidad de buscar nuevos mecanismos para financiar el mantenimiento vial. Entre las posibles soluciones que propone el ODOT están: el peaje por distancia recorrida; el cargo por congestionamiento; y la creación de nuevas instalaciones (autopistas, puentes, estacionamientos, servicios) con cargos. Una conclusión importante del grupo de trabajo referido es que la única fuente de ingresos general que podrá reemplazar el impuesto al combustible será un cargo por distancia, indicando además una primera estimación de US\$ 0.25 por milla recorrida (ODOT, 2005).

Estos esquemas tarifarios descritos tienen en común el enfoque de cobros diferenciales, con base en parámetros que reflejen el grado del impacto que causan los camiones, con lo que el procedimiento de cobro ha resultado ser una medida de control que considera la cuestión de la equidad en la aplicación de los cargos. Este principio va en concordancia con las tendencias de las políticas de transporte en Europa, que buscan que los usuarios del transporte cubran los

costos totales que causan sus movimientos en el sistema carretero (Dalbert, 2001; AFD, 2000) para de ese modo promover una utilización más racional de la Red Transeuropea.

## 4 Control óptimo de flujos de carga por inducción en la selección de la ruta

---

El movimiento de carga resulta de las decisiones de múltiples actores. Mahmassani (2000) los describe como “la dimensión del usuario” para el transporte de carga, distinguiendo: a) el sector público involucrado en la planeación; b) el sector privado en el negocio de autotransporte de carga (esto es, cargadores, transportistas, proveedores logísticos); y c) operadores de grandes terminales de carga, generalmente ligadas al sector público pero presionadas por la competencia a trabajar como empresas redituables. Cada uno de estos actores con sus propios objetivos y medidas de desempeño, interactúa con los otros generando así los flujos de carga.

Mucho de la investigación que se ha hecho en modelación del transporte de carga se ha relacionado con los actores involucrados en la operación, es decir, productores, embarcadores, transportistas, proveedores logísticos, y consumidores. Los impactos usualmente considerados en estos enfoques son: congestión vial; accidentes; contaminación ambiental; y ruido. Un rasgo común de la mayoría de estos estudios es que el camino se da por sentado; la infraestructura siempre se supone que está presente, con la calidad adecuada para llevar a cabo el servicio de transporte. Sin embargo, la infraestructura vial es un bien perecedero, que requiere mantenimiento y conservación.

Respecto a la calidad de los caminos, el impacto principal del movimiento de carga no es la congestión, sino más bien el daño al pavimento; está más relacionado con los pesos de los ejes que los camiones imponen al camino, que a la contaminación que genera el tráfico de carga. Esto naturalmente lleva a considerar al planificador, como un actor interesado en el movimiento de carga, que tiene la responsabilidad del mantenimiento carretero y es afectado por la selección de rutas que hacen los transportistas (factor de carga, selección de modo y selección de ruta).

En este capítulo se muestra un esquema para el control óptimo de los flujos de carga en una red carretera, enfocado a minimizar los costos de mantenimiento que tiene que enfrentar el administrador del camino. El interés por este enfoque se relaciona con la cuestión del mantenimiento carretero en México, no muy diferente a la de otros países en el mundo. En el problema del mantenimiento vial, es común que los requerimientos para atender la red libre de peaje, la que en general tiene infraestructura de menores especificaciones que las de la red con peaje, resulten notablemente mayores a los costos de mantenimiento de esta última.

Las diferencias en las longitudes de estas redes (con cerca de 110.000 km de carreteras libres de peaje, y alrededor de 7.000 km de carreteras de cuota en el año 2003), junto con el habitualmente limitado presupuesto del responsable del mantenimiento de la red libre de peaje, sugieren analizar el reparto de tráfico de

carga entre la red libre de peaje y la de cuota a fin de buscar patrones de flujo con menores potenciales de daño a la infraestructura, y que por tanto mejoren las metas de mantenimiento del responsable de la carretera.

Así, para el administrador del camino libre de peaje podría resultar más eficiente dedicar parte de su presupuesto para mantenimiento vial, a cubrir un estímulo económico que indujera a los transportistas a cambiar sus rutas, y utilizar más las carreteras de cuota. Esta iniciativa del administrador carretero podría desviar tráfico de la red libre de peaje, donde los recursos para mantenimiento y las especificaciones del camino son limitados, hacia los tramos de carreteras de peaje, en las que el ingreso captado permite recuperar costos de mantenimiento además de que la mejor infraestructura de estas carreteras resulta menos impactada por los pesos de los camiones en el tráfico de carga.

## **4.1 Las interacciones entre el responsable de la carretera y los usuarios**

En el marco de análisis para el autotransporte de carga, la red de caminos representa el mecanismo de oferta, el cual es regulado por el responsable de la carretera a fin de minimizar el costo total de mantenimiento de la infraestructura, sin restringir la circulación de carga que requiere la actividad económica. Esta descripción se ajusta al conocido paradigma de *Diseño de Red* (Network design, en la literatura inglesa). Y si bien originalmente el término se usó para referirse a los cambios en la infraestructura de un sistema de caminos (construyendo, cerrando, o modernizando tramos) hechos para mejorar su operación, en la práctica realmente significa seleccionar de entre un conjunto de mejoras potenciales en una red vial dada, más que diseñar una red completamente nueva (Dantzig & Maier, 1979; Bell & Iida, 1997).

Gentile y Papola (2001) han descrito concisamente el *Problema de Diseño de Red* (Network Design Problem) como la búsqueda de una configuración de la red de oferta de transporte y un patrón de flujo de demanda, que conjuntamente maximicen una función objetivo de tipo social, a la vez que respetan restricciones de oferta y demanda predeterminadas. En cualquier caso, la compensación entre beneficios para los usuarios y los costos de los cambios requeridos es tomado en cuenta. Ligado con esto, políticas de transporte recientes cuyo propósito es que el autotransporte cubra los costos de infraestructura que genera, a fin de reducir el uso de fondos públicos (Dalbert, 2001; European Commission, 2002) sugieren la búsqueda de formas eficientes para administrar cualesquiera recursos dedicados al mantenimiento de las redes carreteras.

Desde un punto de vista ingenieril, la interacción entre la demanda de transporte expresada en una matriz origen-destino y la oferta de transporte representada por la red carretera, ocurre dentro del sistema de transporte terrestre de carga, conformado por la infraestructura de los caminos y los actores que interactúan

entre sí para generar los flujos vehiculares (Daellenbach, 1997). En este sistema, la demanda de transporte representa la entrada al sistema, la cual es transformada por los componentes de éste (la red carretera y las reglas de decisión tanto para usuarios como para el planificador del camino) en salidas esperadas como patrones de flujo vehicular o captación de ingreso por peaje, e impactos tales como la contaminación ambiental o el daño a la infraestructura.

Las *entradas no controladas* del sistema llegan como parámetros que no pueden cambiarse (al menos en el corto plazo), tales como la matriz de origen-destino, la forma de la red o las características de la flota vehicular. Las *entradas controladas* al sistema son aquellas que pueden ser modificadas por el planificador de la carretera. Ejemplos de ello son variables que pueden cambiarse en el corto plazo, como posibles descuentos en el peaje, o la intensidad de los esquemas de vigilancia de los reglamentos (p ej, el número de patrullas o de estaciones de pesaje activos), o variables que requieren algún procedimiento legal o administrativo previo al cambio como, por ejemplo, los límites máximos permitidos de pesos y dimensiones de los vehículos, o los máximos niveles de peaje autorizados.

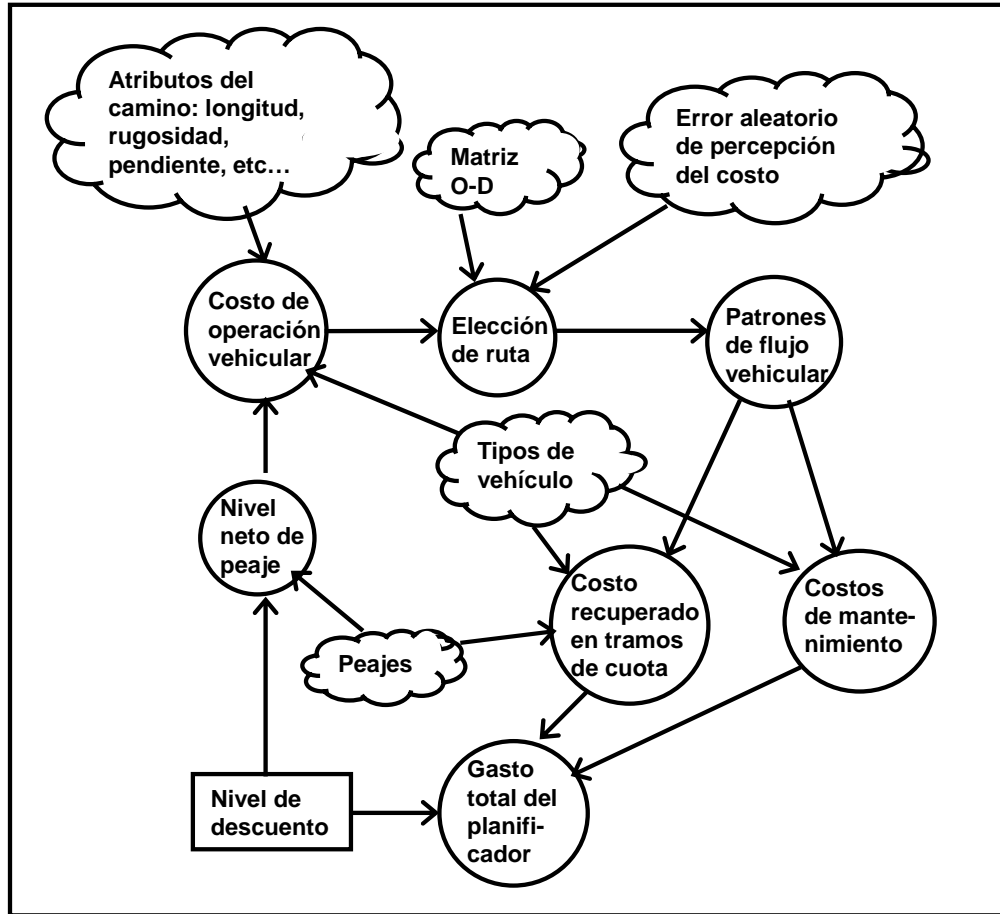
En este sistema, la iniciativa la toma el planificador del camino, quien elige un mecanismo de regulación del sistema para ejercer influencia en el tránsito de los vehículos de carga en la red vial. El estado que describe a este sistema es el nivel de gasto que se requiere para mantener las carreteras en buenas condiciones. Distintas acciones del planificador tendrán diferentes resultados en términos del gasto del planificador, de modo que la búsqueda de un esquema de optimización resulta natural. En este capítulo, el mecanismo de control propuesto para el planificador consiste en un descuento al nivel de cuotas pagado en el subsistema de carreteras de peaje.

Respecto a los componentes del sistema, un *diagrama de influencias* (Daellenbach, 1997), llamado también *diagrama causal* (Abbas & Bell, 1994; Redd & Schneider, 1996), ayuda a entender las interacciones e influencias entre las partes del sistema, tal como se ilustra en la figura 4.1.

El diagrama de influencias es una técnica de uso común en la *dinámica de sistemas* (system dynamics, en inglés) que es un enfoque de simulación donde se estudia la evolución de un sistema en el tiempo. Para los fines de este trabajo, el diagrama se usa en una forma más sencilla, como un medio para esclarecer las relaciones de influencia entre las entradas al sistema y sus componentes, entre los componentes del propio sistema y entre los elementos del sistema y las salidas del mismo (Daellenbach, 1997).

En el diagrama, los símbolos de nube indican entradas no controladas o datos que llegan al sistema; los círculos representan variables o componentes del sistema; mientras que los rectángulos, denotan entradas controladas del sistema. Las flechas señalan la dirección de la influencia, así por ejemplo, la elección de ruta por el transportista está influenciada por los costos de operación del vehículo, el

error aleatorio de la percepción de los costos y la matriz origen-destino que representa la demanda.



**Figura 4.1**

**Diagrama de influencia para el problema de sobrepeso en camiones de carga**

El diagrama de influencias sugiere un método para abordar el problema del desvío de flujos de carga hacia los tramos de peaje.

Primeramente, el costo de operación vehicular en cada tramo de la red carretera debería expresarse en función de las características del camino (longitud, tiempo de tránsito, pendiente y rugosidad); el tipo de camión; y el nivel del peaje (si es que se tiene). En segundo lugar, el proceso de elección de ruta debería considerar la matriz O-D; el costo de operación vehicular en cada tramo del camino; y el error de percepción del costo por los operadores. Como tercer punto, una vez que el tránsito vehicular en cada tramo se conoce, los costos de reparación del camino se pueden calcular con base en el costo unitario de daño por kilómetro en cada tramo, el tipo de camión, la longitud del tramo y el flujo vehicular que cruza. Finalmente, dados los niveles de peajes establecidos, la magnitud del estímulo económico impacta el nivel efectivo de peaje que pagan los camiones; con el consecuente efecto en sus costos de operación vehicular; al mismo tiempo, el



nivel del estímulo económico afecta el gasto total del responsable de la carretera al añadir este desembolso al gasto total dedicado a las tareas de reparación del camino.

El marco de análisis que se presenta es un primer paso en la búsqueda de acciones sensatas del planificador del camino con el fin de reducir el gasto total en las tareas de conservación. Este propósito, aun cuando no se presenta en términos precisos de impacto a la sociedad en general, es mostrado con un enfoque sistémico, donde el logro del desempeño óptimo del planificador de la carretera lleva a soluciones que evitan la imposición de nuevas tarifas de peaje o nuevos impuestos por el uso de la infraestructura, esquivando así las cargas impositivas excesivas y la reducción de bienestar que son típicos de las medidas que involucran el uso de fondos públicos (Ferrari, 2002b).

## 4.2 El enfoque de modelación

La base para modelar las interacciones entre los camiones que utilizan la carretera y los responsables de la misma es el cálculo de los costos de cada una de las partes, y las correspondientes acciones factibles al alcance de cada quien a fin de reducir sus propios costos.

Un enfoque de uso común en la modelación del transporte de pasajeros es la búsqueda de los peajes que permitan modular los flujos carreteros hacia un patrón de *equilibrio social*, donde se logre el costo promedio mínimo o el costo total mínimo de los viajes realizados sobre la infraestructura; esta condición de equilibrio se conoce en la literatura como el *segundo principio de optimalidad de Wardrop* (Ortúzar y Willumsen, 1994, p. 305). Este criterio de equilibrio, de naturaleza normativa, implica tener la posibilidad de imponer peaje en todos los tramos de la red carretera, una medida difícil de implantar en la práctica. Semejante dificultad ha llevado a los modeladores a buscar soluciones del tipo del “segundo mejor” (“second-best”, en la literatura inglesa), en las que algunos tramos de la red carretera relacionados con restricciones inamovibles (por razones prácticas, físicas o políticas) jamás tendrán peaje alguno, y la mejor de las soluciones bajo estas condiciones es buscada.

En lugar de esta perspectiva de equilibrio social, el esquema presentado en este trabajo considera una red carretera donde ya existe un subsistema de peaje que opera regularmente. En vez de tratar de establecer nuevos peajes o zonas de acordonamiento, el enfoque basado en el mecanismo que determina la elección de ruta de los usuarios, intenta influir en la respuesta de éstos a fin de desviar los flujos de carga que circulan sobre los tramos de carretera más vulnerables, generalmente en partes de la red que no tienen peaje, hacia los tramos de mejores especificaciones del subsistema de carreteras de peaje. De esta manera, la búsqueda del mejor patrón de flujos carreteros respecto de los objetivos de mantenimiento del responsable de la carretera es posible, aun cuando la solución no sea en general, tan buena como la solución teórica de equilibrio social.

En un caso general la red carretera tendrá tramos con peaje y tramos libres. El responsable de la carretera, generalmente con un presupuesto limitado para reparaciones y mantenimiento del camino, podría pagar un estímulo económico a los camiones a fin de que usen el subsistema de peaje. Así, las reducciones de costos en reparaciones del camino sobre los tramos más vulnerables llegarían a superar el gasto extra requerido en el esquema de subsidio, permitiendo al encargado del camino utilizar estos ahorros para incrementar la calidad de los trabajos de mantenimiento o transferir recursos a la siguiente área de prioridad de atención en la red carretera libre de peaje.

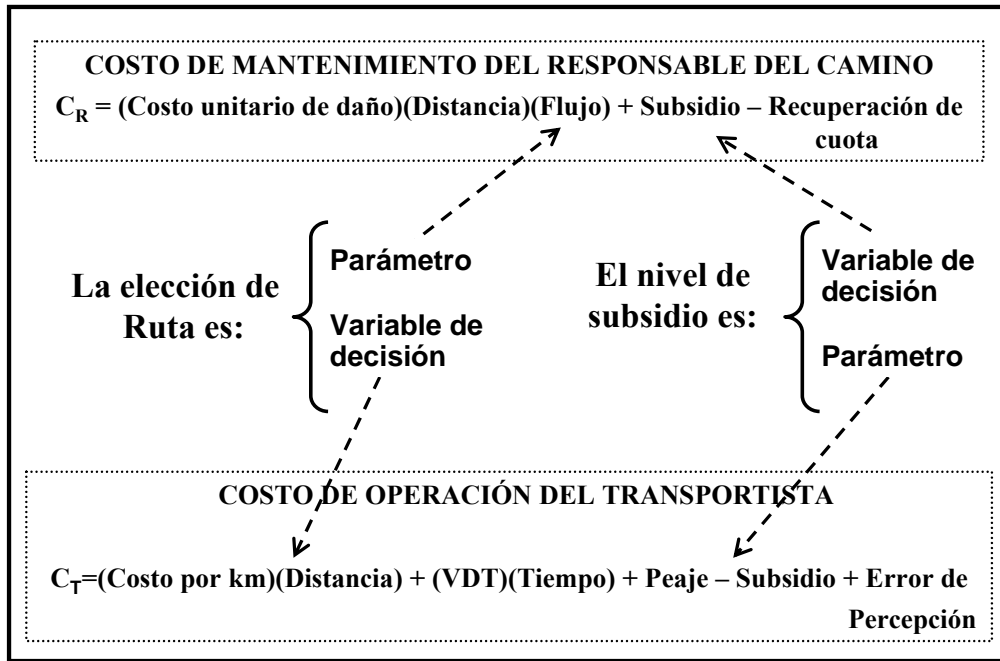
El costo para los camiones considera dos factores: a) los costos de operación relacionados con las características del camino tales como longitud, tipo de terreno y peaje (si hay alguno); y b) el valor del tiempo (VDT) empleado en el viaje. Este costo mide la utilidad (negativa en este caso) obtenida cuando se elige una ruta para el viaje, y será el argumento para la función que modela la selección de ruta.

Por su parte, el costo para el responsable de la carretera se basa en las reparaciones del camino como resultado del tráfico de carga en la red, más el gasto total del subsidio pagado para promover el desvío de los vehículos de carga hacia los tramos carreteros con peaje. El costo de reparaciones del camino proviene del daño al pavimento ocasionado por los ejes equivalentes (ESALs) dentro de los flujos de carga. Partiendo del daño unitario de un ESAL-km, el costo de deterioro del camino se obtiene multiplicando este costo unitario por la longitud del tramo y por el número de ESALs correspondientes al vehículo. Una vez que el flujo total en un tramo se estima, el costo para el responsable de la carretera se obtiene sumando estos productos sobre todas las clases vehiculares que circulan, añadiendo además el subsidio pagado a los camiones que usen los tramos con peaje. Sobre los tramos con peaje, se puede recuperar una fracción de la cuota cobrada como una compensación de las reparaciones que el camino necesitará, de modo que en estos tramos, este ingreso se deduce del costo total para el responsable del camino.

El gasto total del responsable del camino resulta entonces ser el costo de deterioro del pavimento en toda la red más el efecto neto del subsidio otorgado, menos la fracción del peaje para recuperación de costos de mantenimiento que se obtiene en los tramos tarifados. El costo para el transportista es el costo de operación resultante de su elección de ruta, influenciada a su vez por el nivel de subsidio al peaje otorgado por el responsable de la carretera; el tiempo de viaje; las características de la ruta (longitud, pendiente, etc); y el error de percepción de los costos de cada camión individual que decide una ruta.

Las decisiones de los transportistas y del responsable del camino, sin embargo, no son independientes y se influyen mutuamente. Al elegir una ruta, los transportistas determinan el mantenimiento requerido del camino; mientras que al fijar el plan de subsidios al peaje, el responsable del camino determina la estructura de costos

para los transportistas. Esta influencia mutua entre transportistas y responsable de la carretera en dicho proceso se muestra en la figura 4.2



**Figura 4.2**

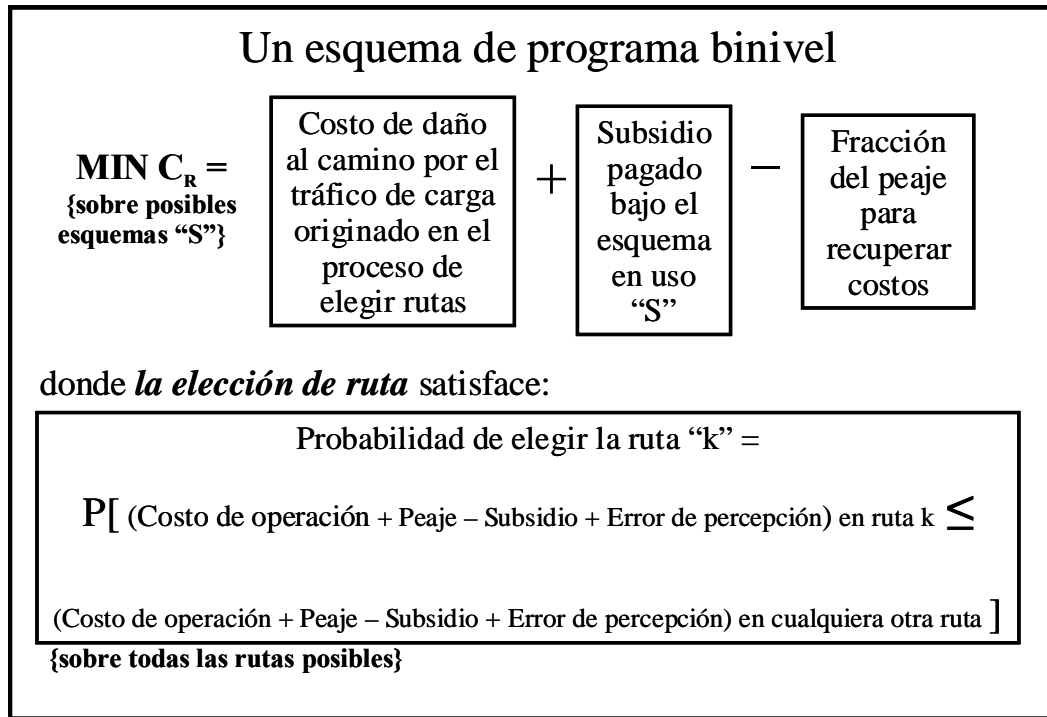
**Influencia mutua entre transportistas y responsable de la carretera en el transporte de carga**

De este modo, mientras que la elección de ruta por los camiones es un parámetro para el cálculo de los costos del responsable del camino (en vista del patrón de flujos que resulta), esta elección es una variable de decisión que entra en las estimaciones de costo de los transportistas. De modo análogo, el nivel de subsidio es una variable de decisión que cuenta en los cálculos de costos para el responsable del camino, pero resulta un parámetro a considerar en los cálculos de costos para el transportista.

Debido a que los dos actores referidos buscan lograr sus propios desempeños óptimos, y ya que el responsable del camino en su papel normativo toma decisiones mejor informadas para anticiparse a las posibles respuestas de los transportistas, además de que tiene la prerrogativa de fijar el subsidio a los peajes, se puede plantear un enfoque de *programación binivel* para este problema, en el cual el responsable de la carretera toma la iniciativa para seleccionar un esquema apropiado de subsidio "S", a la vez que prevé el impacto de este subsidio en las decisiones de los transportistas que buscan su "mejor" ruta de acuerdo con sus propios objetivos. La figura 4.3 muestra un diagrama de bloques que ilustra esta idea.

Sobre esta base, en la siguiente sección se describe la formulación matemática del enfoque de programación binivel descrito, así como un procedimiento de

solución en el que el responsable del camino selecciona el nivel de subsidio a fin de lograr el mejor de los desempeños para sus objetivos de mantenimiento y reparación de la red carretera.



**Figura 4.3**

**Un enfoque de programación binivel para el problema de los flujos de carga**

### 4.3 La formulación del modelo matemático

Teniendo en mente el objetivo del responsable del camino de minimizar el gasto total dedicado a las tareas de mantenimiento de la red carretera, las restricciones impuestas al programa matemático se utilizan para representar el reparto de los flujos vehiculares inducido por el modelo probabilístico que determina las elecciones de ruta de los camiones. Ahora bien, distintos modelos pueden resultar dependiendo de la distribución de probabilidad utilizada para representar el *costo percibido* por el transportista en las distintas rutas.

Dos modelos de uso común para este propósito son el *modelo logit* y el *modelo probit*. El modelo logit supone que la variación en la percepción de los costos es un error aleatorio con una distribución de Gumbel. Este supuesto da un modelo tratable tanto en el aspecto analítico como en el computacional, aunque tiene dificultades para manejar las utilidades correlacionadas que surgen en rutas que comparten tramos comunes, de modo que puede resultar no muy realista para redes grandes que presentan muchas rutas que se traslapan en multitud de tramos (aunque para casos de redes pequeñas con rutas alternas paralelas puede trabajar adecuadamente).

El modelo probit supone que la variación en la percepción de los costos es un error normalmente distribuido, reflejando así el efecto aditivo de muchos factores que influyen en esta percepción. La principal ventaja de este modelo sobre el modelo logit es que los errores de percepción se pueden fijar para los tramos de la red carretera, con lo que los errores de percepción del costo en una ruta se obtienen sumando los errores de percepción en los tramos relevantes de la ruta. De esta manera, el modelo probit automáticamente resuelve el problema de la utilidades correlacionadas en las rutas que se traslapan en tramos comunes (Sheffi, 1995, p. 302). Planteado como un problema de optimización, el problema del mantenimiento óptimo de la red carretera se describe en el programa matemático (4.1) a continuación:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z &= \sum_a \left[ \sum_j (A_j L_a V_{aj} + (S_{aj} - R_a) F_{aj} V_{aj} \lambda_a) \right] \\
 \text{sujeta a:} \\
 V_{aj} &= \sum_r \sum_s \sum_k P_{kj}^{rs} Q_j^{rs} \delta_{ka}^{rs} \\
 P_{kj}^{rs} &= P \left[ U_{kj}^{rs} \geq \max \{ U_{nj}^{rs} \mid \forall n \in K^{rs} \} \right] \\
 U_{kj}^{rs} &= \sum_a (-C_{aj} L_a - M_j T_a - F_{aj} (1 - S_{aj}) \lambda_a + \varepsilon_j) \delta_{ka}^{rs} \\
 0 &\leq S_{aj} \leq 1
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Donde:

$A_j$  = costo unitario de un ESAL-km para el camión tipo  $j$

$L_a$  = longitud del tramo  $a$

$V_{aj}$  = flujo de camiones tipo  $j$  en el tramo  $a$

$S_{aj}$  = porcentaje de subsidio para vehículos tipo  $j$  en el tramo  $a$

$R_a$  = fracción del peaje para recuperar costos en el tramo  $a$

$F_{aj}$  = peaje en el tramo  $a$  para vehículos tipo  $j$

$\lambda_a = 1$  si el tramo  $a$  tiene peaje, 0 en otro caso

$P_{kj}^{rs}$  = probabilidad de que la ruta  $k$  de  $r$  hacia  $s$  sea elegida por el camión tipo  $j$

$Q_j^{rs}$  = flujo de vehículos tipo  $j$  de  $r$  hacia  $s$

$\delta_{ka}^{rs} = 1$  si el tramo  $a$  está en la ruta  $k$  del origen  $r$  al destino  $s$ , 0 en otro caso

$U_{kj}^{rs}$  = utilidad del camión tipo  $j$  en la ruta  $k$  de  $r$  hacia  $s$

$K^{rs}$  = el conjunto de rutas que conectan al origen  $r$  con el destino  $s$

$C_{aj}$  = costo de operación unitario para el camión tipo  $j$  en el tramo  $a$

$M_j$  = valor del tiempo para el camión tipo  $j$

$T_a$  = tiempo de viaje en el tramo  $a$

$\varepsilon_j$  = error de percepción del costo para el camión tipo  $j$ , distribuido  $N(0, \sigma_j^2)$

La complicada estructura del problema (4.1) limita el uso del típico método de multiplicadores de Lagrange para resolver problemas de optimización con restricciones. Aparte de la carencia de una fórmula explícita para el cálculo de la probabilidad normal multivariada implícita en el planteamiento del problema, la segunda restricción en el programa matemático 4.1 expresa por sí misma una condición de optimalidad sobre la utilidad para el camión que elige la ruta; esto es, para escribir adecuadamente el lagrangiano del problema esta restricción no es meramente una relación implícita entre las variables, sino un problema de optimización completo por sí mismo (es decir, la elección de ruta con el modelo probit). Por otra parte, aun cuando el lagrangiano del problema y las condiciones de primer orden (anulación de las derivadas) pudieran escribirse apropiadamente, el *encontrar la solución* del sistema de ecuaciones resultantes no es, en general, un asunto fácil.

La sustitución de restricciones dentro de la función objetivo convierte al planteamiento original en un problema de optimización sin restricciones, el cual una vez que se fijan los parámetros que definen las características del camino y de los vehículos, deja como única variable de decisión a controlar el vector de subsidios (es decir, el porcentaje de descuento en cada peaje). Este problema podría resolverse (en principio) con algoritmos numéricos estándar. El más eficiente de estos algoritmos (quasi-Newton) requiere información de las primeras derivadas, lo que implica entre otras cosas poder calcular las derivadas del flujo en las rutas con respecto al nivel de subsidio.

Este modelo, si se desarrolla mediante una elección de ruta con base probit, paga el precio de una representación más realista que la proporcionada por el modelo logit, en que carece de un tratamiento directo, debido a la presencia de la distribución normal multivariada que permite estimar la elección de ruta por los camiones. No obstante, es un hecho muy conocido que esta dificultad puede superarse estimando los flujos tipo probit en las rutas por medio de simulación Monte Carlo (Sheffi, 1985, p. 300-302), y esta posibilidad sugiere a su vez el uso de métodos de optimización que no requieren de derivadas, como el método Downhill Simplex, o el método de Powell (Nelder & Mead, 1964; Powell, 1964).

Press, et al (1992) presentan algunos códigos de computadora para estos métodos que no necesitan calcular ninguna derivada, sino sólo evaluaciones de la función objetivo a optimizar, las que se pueden obtener fácilmente por medio de simulación.

Como una ventaja teórica, no obstante que estos métodos no garantizan resolver el *problema del óptimo global*, es que son capaces de encontrar óptimos locales en tiempos razonables de cómputo, dando así al responsable de la carretera una solución práctica para mejorar su función objetivo.

Respecto de las variables del modelo, si bien en teoría son números reales, los cálculos con la computadora dan sólo aproximaciones con números racionales, aunque con mucha precisión. Esta alta precisión de los cálculos, es por otra parte mucho mayor de la que se requiere para el propósito del modelado del control de tráfico de carga.

En vista de lo anterior, la aproximación que se puede obtener con un procedimiento que encuentre al menos un óptimo local, parece ser una forma sensata de empezar a probar distintos escenarios de subsidio en la búsqueda de reducciones en el gasto total de mantenimiento del camino para el responsable del mismo.

Como una ventaja práctica, la relativamente rápida estimación de los flujos vehiculares que se logra con la simulación Monte Carlo, permite un examen de las variaciones en el costo total del responsable de la carretera (función objetivo) al explorar diversos de valores de subsidio (en porcentajes de descuento al peaje) sobre el rango práctico de subsidios que se pueda implementar, permitiendo evaluar de esta manera si son deseables y alcanzables cálculos más refinados.

Aparte de estas consideraciones alrededor de la búsqueda de soluciones al problema (4.1), conviene hacer notar que en el modelo subyacente la dimensión temporal no se considera. Este proceso de modelado, sin embargo, podría admitir una extensión para incluir la variación temporal de algunas condiciones que afectan a las soluciones óptimas desarrolladas en los párrafos precedentes, siempre que estén disponibles los datos necesarios y las formas funcionales relevantes para la extensión.

La importancia del tiempo en el proceso de modelado se vuelve evidente cuando se consideran las condiciones físicas del sistema carretero y los valores de algunas variables económicas que generalmente cambian a medida que transcurre el tiempo. Las condiciones iniciales encontradas al momento en que el responsable del camino decide implantar el esquema de subsidios también influye. Así, si el esquema de subsidios se inicia con una red carretera en muy mal estado, el esfuerzo requerido para mantener un buen nivel de calidad en los caminos es mayor que si al inicio del esquema de subsidios, la red carretera presenta un deterioro dentro del rango esperado.

Las condiciones típicas que cambian con el tiempo, y afectan los cálculos de costo tanto para los transportistas como para el responsable de la carretera son: la degradación natural de la superficie de rodamiento (aumento del IRI), que incrementa los gastos de mantenimiento de los vehículos y sus consumos de combustible; la inflación, que afecta los precios de los insumos requeridos por el responsable de la carretera para la rehabilitación de caminos, y también los precios de los vehículos mismos, el combustible, y las refacciones que utilizan los transportistas; el incremento general de salarios que afecta tanto al responsable de la carretera como a los transportistas; los cambios en el valor del tiempo de ciertas mercancías transportadas como resultado de la competencia en el transporte terrestre de carga, o los incrementos periódicos del peaje en el sistema carretero que afecta el costo de operación del transportista.

La disponibilidad de datos que describan estos cambios a lo largo del tiempo, así como las ecuaciones adecuadas que representen los cambios de estas variables con el tiempo, serían los elementos esenciales requeridos para desarrollar una representación dinámica del sistema carretero acorde con el proceso de modelación descrito en párrafos anteriores. Este trabajo señala ya una línea de investigación futura.

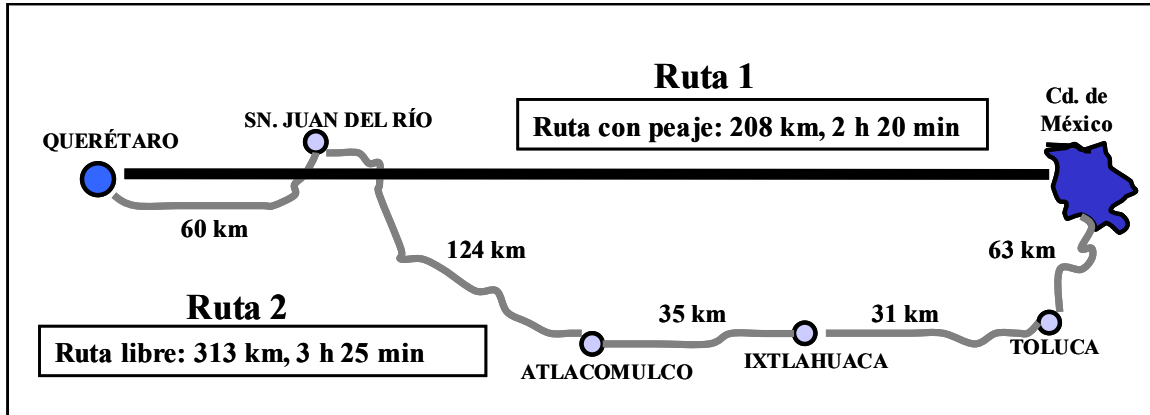
#### **4.4 Un ejemplo ilustrativo**

En este sencillo ejemplo se busca establecer un control de flujos de carga en una elección de rutas alternas, de las cuales una es libre y la otra es de peaje. La alternativa con peaje es un camino con mejores especificaciones que el camino libre, además de que es más corto y con menor tiempo de recorrido que la ruta libre. Mientras que los gastos de mantenimiento carretero son mayores para el responsable de la carretera en el tramo libre de peaje, los costos para el transportista dependen de la percepción que éste tenga del costo de operación. El responsable de la carretera, tratando de reducir su gasto total en las tareas de mantenimiento vial utiliza un incentivo económico para atraer a los transportistas hacia la ruta con peaje.

Aunque el ejemplo mostrado utiliza datos de 2001, ilustra razonablemente la política de incentivo económico descrita anteriormente (Moreno & Watling, 2002). La ciudad de Querétaro es un paso frecuente de los flujos de carga que van hacia la frontera norte del país y que se originan en la Ciudad de México. Dos rutas alternas muy utilizadas para viajar entre ambas ciudades se muestran en la figura 4.4. La ruta 1 es una carretera de peaje con seis carriles y pavimentos en buenas condiciones regularmente; la ruta 2 no tiene peaje, es de dos carriles y el estado del pavimento suele deteriorarse en temporada de lluvias. Un valor típico de tránsito diario promedio anual es de 6.400 vehículos (Rico, Mendoza y Mayoral, 1998). La intención del responsable de la carretera es persuadir a los transportistas a utilizar la ruta de peaje por medio de un esquema de subsidio, mediante el cual trata de minimizar el gasto total de mantenimiento en *ambas*



*rutas*, al tiempo que se anticipa a las posibles respuestas de los transportistas al nivel efectivo del peaje en la ruta 1.



**Figura 4.4**  
**Rutas alternas Ciudad de México a Querétaro (CAPUFE, 2002)**

Independientemente del esquema del subsidio, cada nivel de peaje induce cierto reparto de los flujos vehiculares entre las dos rutas. Para propósitos de presentación del ejemplo, se supondrá un *modelo logit binario* para representar el reparto de los flujos entre las rutas. El uso de un modelo probit, cualitativamente no alteraría los resultados, ya que en este ejemplo las rutas no tienen traslapes importantes que comprometan la correlación de utilidades para el transportista. La relación usada para este modelo logit, mostrada en la ecuación (4.2) proviene de un modelo de regresión derivado a partir de datos de 30 carreteras mexicanas con alternativa libre, en un estudio del Instituto Mexicano del Transporte (Rico, A., Mendoza, A. y Rivera C., 1995).

$$P_1 = \frac{1}{1 + e^{1.2 + 0.03(c_1 - c_2)}} \quad (4.2)$$

En esta ecuación,  $P_1$  es la probabilidad de que el transportista elija la ruta con peaje;  $c_1$  y  $c_2$  son los costos generalizados promedio en la ruta con peaje y en la ruta libre, respectivamente; y un valor del tiempo de \$200/hora es supuesto para valorar los tiempos de recorrido en las rutas.

Para el cálculo del costo de deterioro del pavimento, las cargas en los ejes de los camiones se expresan en ejes equivalentes (ESALs). En este ejemplo simplificado se supone un flujo sólo de camiones tipo C2, representando tres ESALs cada uno. Costos unitarios para el deterioro del pavimento de \$0,53 por ESAL-km en el camino libre de peaje, y de \$0,25 por ESAL-km en la ruta de peaje se estimaron a partir de datos del estudio de Rico, Mendoza y Rivera (1995), ajustando los valores para considerar la inflación hasta el año 2001. Una fracción del 40% del peaje se considera como recuperación del costo de deterioro en la ruta 1, que es un valor cercano a la fracción estimada del gasto que reportó CAPUFE en sus estados financieros anuales.

El modelo de costo que resulta para el responsable del camino tiene dos variables: T = nivel de peaje, y S = nivel de subsidio como porcentaje de descuento al peaje, con lo que se plantea el siguiente problema de optimización una vez agregadas las constantes necesarias, y habiendo simplificado las expresiones:

$$\text{Min } Z = (156 + (S - 0.4)T)f_1 + 497.7f_2$$

$$\text{sujeta a : } f_1 = \frac{6400}{1 + e^{1.2+0.03(T(1-S)-216.67)}} \quad (4.3)$$

$$f_1 + f_2 = 6400$$

En este planteamiento, Z es el gasto neto total dedicado al mantenimiento carretero, incluyendo el pago de subsidio; y  $f_1$ ,  $f_2$  son los flujos en las rutas 1 y 2 respectivamente. Fijando la cuota al valor vigente para el año 2002 (T = \$204) a fin de tener consistencia con los precios usados en el ejemplo, el problema de optimización ya sólo depende de la variable S.

La figura 4.5 muestra la función objetivo del problema (4.3) para distintos niveles de subsidio, con lo que la solución óptima es  $S^* = 0,4877$ , que produce el reparto de flujo óptimo  $f_1^* = 5.741$  y  $f_2^* = 652$ , logrando un gasto total mínimo de \$1.326.620,00. En el ejemplo es claro que la solución óptima es preferible a la situación original sin subsidio.

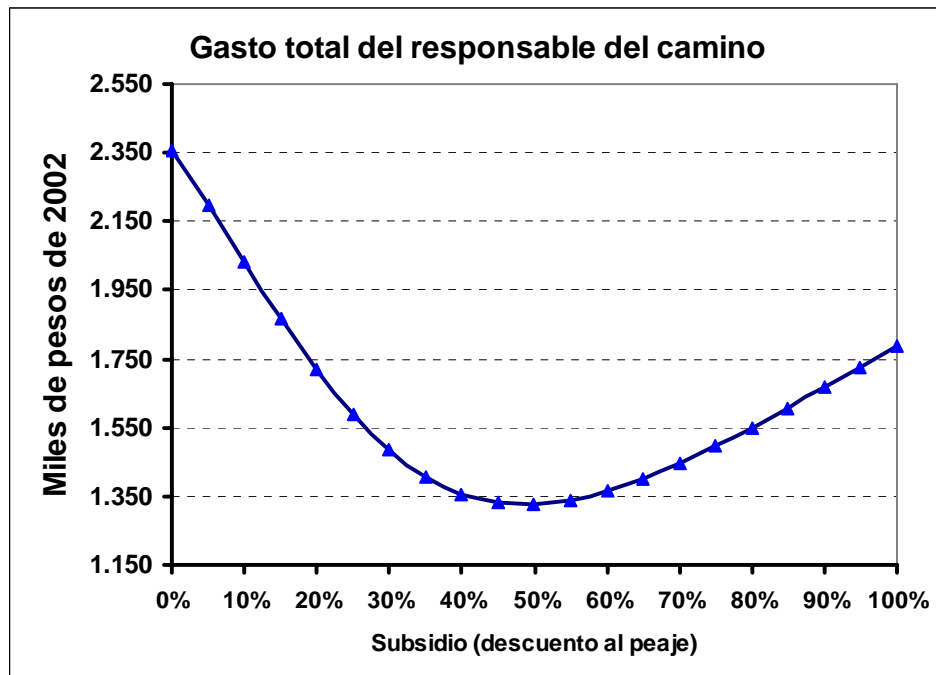


Figura 4.5  
Gasto neto total del responsable del camino vs nivel de subsidio

A pesar de la sencillez del ejemplo presentado, el subsidio óptimo que resulta es positivo, lo que sugiere que el esquema mostrado puede ser razonable en el ámbito de desarrollo de políticas para el transporte de carga. El beneficio final del esquema es la motivación para que los transportistas procuren evitar las carreteras más sensibles al deterioro (p ej, las libres de cuota) contribuyendo así a reducir los gastos de mantenimiento del responsable del camino.

## 4.5 Consideraciones sobre la implantación

El problema de optimización descrito (4.1) se ajusta bien al modelo de elección discreta, es decir, el marco teórico que explica las elecciones que hacen los individuos cuando tienen un número finito de opciones. El supuesto de que el transportista trata de minimizar su costo de viaje y a la vez tiene un error aleatorio en la percepción del costo, conduce a considerar una utilidad aleatoria para el transportista como su medida de desempeño. Su contraparte en el sistema de tráfico de carga, el responsable de la carretera, ejerce influencia en la selección de ruta que hace el transportista a través del mecanismo de subsidio al peaje.

El transportista considera los costos del viaje en cada tramo como dependientes de la longitud del tramo, el tiempo de recorrido y el peaje (si hubiera). Dado un costo unitario de operación vehicular (CUO) y un valor del tiempo (VDT) para el transportista, el costo de utilizar un tramo dado es:

Costo del transportista =

$$\text{CUO}(\text{Longitud del tramo}) + \text{VDT}(\text{tiempo de recorrido}) + \text{peaje} - \text{subsidio} \quad (4.4)$$

Los factores que se supone inciden en los costos de operación vehicular son los siguientes: a) velocidad de tránsito; b) pendiente media del camino; y c) rugosidad media del camino (esta última medida con el índice internacional de rugosidad, IRI). La influencia del tiempo en el costo del viaje se basa en el valor del tiempo (VDT) para el transportista. En el transporte de carga, a diferencia del de pasajeros que se basa en el ingreso del viajero, el VDT se relaciona de modo natural con los costos que varían con el tiempo de recorrido, tales como el pago a la tripulación o el interés del capital asociado al inventario en tránsito; este enfoque se conoce como el método de los factores de costo para evaluar el valor del tiempo en el transporte de carga (Gwilliam, 1997).

Teniendo estimaciones de costo sobre cada tramo de la red, un error aleatorio de percepción se usa para alterar estos costos ligeramente, representando así a los transportistas que toman decisiones, percibiendo una utilidad aleatoria (el valor negativo de los costos de viaje) en cada ruta posible para su viaje. Esta utilidad es reducida por el pago del peaje y aumentada por el subsidio correspondiente. Conocidos el origen y el destino del viaje, se selecciona entonces una ruta sobre la base de maximizar la utilidad esperada, es decir, minimizando el costo esperado total del viaje.

El supuesto de que el transportista tiene una percepción aleatoria de los costos de transporte, hace al modelado más realista permitiendo explicar así el hecho comúnmente observado de que individuos enfrentados a las mismas características de ruta, hagan elecciones diferentes.

En cuanto a la diversidad de rutas, la fuerte conectividad que suele presentarse en las redes carreteras reales lleva a considerar múltiples posibilidades para conectar un origen y un destino dados con rutas que se traslapan en varios tramos, y que consecuentemente implican una correlación en las utilidades de las distintas rutas. Dado que el modelo logit multinomial no puede tratar adecuadamente el caso de elección de opciones cuando las utilidades correspondientes se encuentran correlacionadas (Ortúzar & Willumsen, 1994, p. 215), el uso de un modelo probit multinomial resulta ser más adecuado. Y aunque no existe una fórmula directa para el modelo probit multinomial, es posible desarrollar procedimientos prácticos basados en simulación Monte Carlo que generan estimaciones robustas en tiempos razonables de cómputo (Sheffi, 1985, pp. 297-305).

El responsable de la carretera considera dos tipos de costos: los relativos a la reparación del camino debido a deterioro por los ejes equivalentes (ESALs) de los camiones circulando por la carretera; y el subsidio pagado a los vehículos que se desvían a los tramos de cuota. Dado un costo unitario de deterioro del pavimento por kilómetro (CUD), el número promedio de ESALs que cruzan por un tramo y el correspondiente flujo vehicular, el costo para el responsable del camino en ese tramo, se calcula como:

Costo del responsable del camino =

$$(\text{flujo en el tramo})(\text{CUD})(\text{ESALs})(\text{longitud del tramo}) + \text{subsidio pagado} \quad (4.5)$$

Si el tramo tiene peaje, los gastos del responsable del camino aumentan por el subsidio pagado, y se reducen por la fracción del peaje para recuperación de costos, con lo que el gasto total para el responsable de la carretera es:

Gasto total del responsable del camino =

$$\text{costo del responsable del camino} - \text{fracción de cuota para recuperar costo} \quad (4.6)$$

Una vez identificados los elementos de costo tanto para transportistas como para el responsable de la carretera, y dados una red carretera, un tipo de camión y una matriz origen-destino (matriz O-D), se puede desarrollar un método para encontrar el esquema de subsidio óptimo, y el correspondiente patrón de reparto de flujos utilizando simulación Monte Carlo. Iniciando con la información necesaria de los tramos de la red y las características del tipo de camión; y con el esquema de subsidio propuesto por el responsable de la carretera, la simulación Monte Carlo se lleva a cabo, bajo el supuesto de que el error de percepción del costo por los transportistas está distribuido normalmente, estimándose de este modo el patrón de flujos resultante.

Basándose en el esquema de subsidio propuesto y en el patrón de flujos vehiculares estimado por la simulación, el responsable del camino calcula el gasto total como la suma de los costos de reparación del camino más los pagos de subsidio a los vehículos que circularon por los tramos de cuota. El procedimiento descrito puede repetirse para cada uno de los tipos de vehículos que interesen al análisis, a fin de producir el patrón global de flujos en la red carretera para el nivel de subsidio que se haya considerado.

Iterando el proceso de simulación para un rango predefinido de niveles de subsidio se obtiene una perspectiva de las tendencias que sigue el gasto total del responsable de la carretera a medida que los niveles de subsidio cambian, proporcionando de esta forma una primera aproximación que puede servir para ubicar el valor óptimo del subsidio, o para comparar distintos escenarios de subsidio a fin de apoyar la toma de decisiones de los planificadores del sistema carretero. Las principales tareas que ejecuta el programa desarrollado en Fortran95 para el procedimiento descrito, se muestran en la figura 4.6

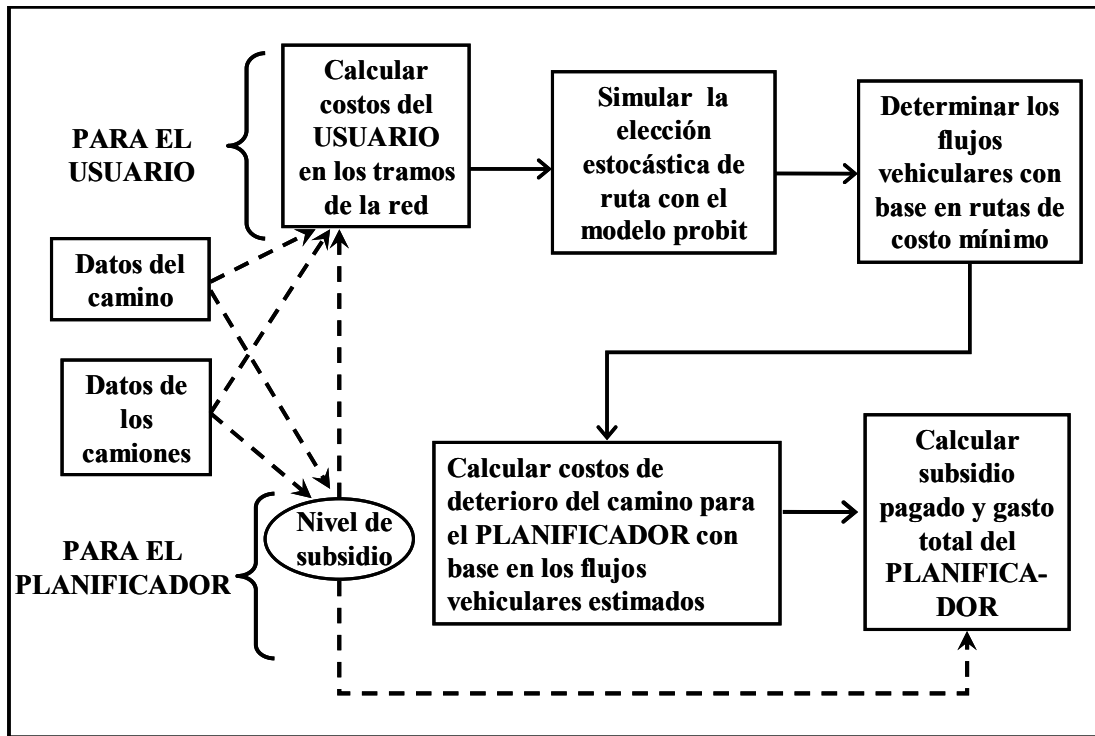


Figura 4.6

Procedimiento de solución para estimar el gasto total del responsable de la carretera, basado en simulación Monte Carlo



## **5 Modelado del control de flujos de carga en una parte de la red carretera nacional**

---

Se presenta un estudio de caso basado en una pequeña parte de la red carretera nacional pavimentada, seleccionada en la región noreste del país colindante con la frontera norteamericana. Esta parte seleccionada tiene un total de 4.000 km (de los cerca de 117.000 km de la red pavimentada) y en este capítulo se le llama la “red de prueba”.

La importancia que tienen las acciones del planificador o del responsable de la carretera para mejorar el manejo de sus tareas de reparación y mantenimiento cobró nuevo impulso al término de la década de los años 90. Los incrementos tanto del tránsito carretero como en el número de vehículos de carga en México en esos años, hizo evidente la necesidad de buscar medidas de control para reducir los impactos adversos de los tráficos de carga. Al finalizar los años 80 y a lo largo de la década siguiente, el movimiento de carga en México tuvo notables cambios debido primeramente a la desregulación del autotransporte de carga en 1989, seguido por la firma del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) en 1994, así como por la privatización de los ferrocarriles mexicanos que arrancó en 1997. Estos cambios indujeron nuevos flujos terrestres de carga, llamando la atención a la cuestión de caracterizar los flujos de vehículos de carga en las carreteras, y a estimar sus impactos en áreas como: selección de ruta, daño a la infraestructura, prácticas de sobrepeso y regulaciones sobre pesos, dimensiones, tarificación, además de esquemas de vigilancia para su cumplimiento.

Entre las diversas líneas de acción para enfrentar los cambios descritos, el asunto de la conservación carretera aparece como un factor crucial a fin de tener fluidez en el tráfico de carga carretero, lo que a su vez facilita tanto la implantación de medidas para armonizar el importante flujo de carga que cruza la frontera norteamericana, como la adopción de políticas para promover la competencia modal con el ferrocarril. El principal actor involucrado para abordar estas tareas de mantenimiento carretero es por supuesto, el responsable de la carretera.

Este responsable del camino comprometido con la conservación de la infraestructura puede identificarse con el tipo de carretera, habiendo uno encargado de la red libre de peaje, y otro (u otros) administrando el subsistema de carreteras de cuota, como ocurre en México donde la Dirección General de Conservación de Carreteras de la SCT (DGCC) asume la responsabilidad de la red federal libre de peaje, mientras que CAPUFE y otros agentes concesionarios atienden las redes de carreteras de cuota (Moreno & Watling, 2002).

Este tipo de problema, claramente encaja en el marco general de interacciones de un sistema de transporte de carga, como se describe en el capítulo 3. En el presente capítulo, el enfoque específico adoptado trata cuestiones de la selección de ruta por los usuarios del camino; el deterioro del pavimento; y las cuotas del subsistema de peaje, conforme a la metodología descrita en el capítulo 3.

## **5.1 Antecedentes del estudio de caso**

Uno de los puntos centrales en la discusión de este estudio de caso son las diferencias tanto en el financiamiento como en la longitud de las redes entre la red federal libre de peaje y el subsistema de caminos de cuota ya mencionados. Por una parte, la red federal libre de peaje con cerca de 42.000 km contrasta en tamaño con el subsistema de peaje, que tiene alrededor de 7.000 km (datos de 2003, SCT). Por otra parte, la DGCC, encargada del mantenimiento de la red federal libre de peaje, recibe su financiamiento directamente de asignaciones otorgadas por la SCT; mientras que el subsistema de caminos de cuota tiene su financiamiento, basado en la recolección del peaje por servicios.

La situación financiera en este sistema carretero ha sido por muchos años contrastante. Mientras que la red libre de peaje ha padecido endémicamente de restricciones presupuestarias para la conservación, el subsistema de peaje ha tenido buen desempeño financiero con excedentes que son enviados al fondo general de recaudación fiscal. Algunas iniciativas para mejorar esta situación han sido propuestas por la SCT (SCT, 2001, pp. 76-84); entre las que se cuentan:

- a) La descentralización de los tramos menos transitados de la red federal libre de peaje, dejándolos bajo control directo de la autoridad estatal que corresponda
- b) La prioridad concedida a la conservación de los 14 corredores principales en la red troncal federal, con una longitud aproximada de 19.000 km y sobre la que circula alrededor del 54% del tráfico interurbano
- c) La creación de un fondo carretero con recursos etiquetados dedicados exclusivamente al mejoramiento de la red federal

La última proposición cristalizó en mayo de 2003 con la creación del Fondo Carretero con una asignación inicial de 4.700 millones de pesos, destinados al objetivo principal de promover asociaciones público-privadas para proyectos de construcción de infraestructura (SCT, 2003b).

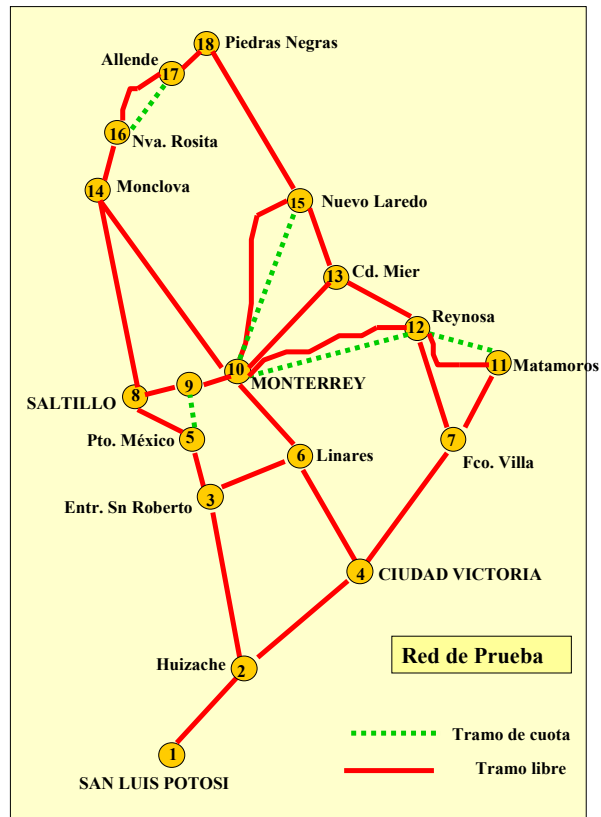
Estas acciones encaminadas a aliviar los impactos del tráfico carretero de carga tuvieron como antecedente el estudio anual de campo (Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional, EECAN) iniciado por la SCT en 1991, con el fin de coleccionar datos de los movimientos de carga a través de encuestas de camino levantadas en la red de carreteras pavimentadas (Rico, et al, 1997).

La red de prueba usada en el estudio de caso está en la región noreste del país, colindante con la frontera norteamericana, esquematizada en la figura 5.1; comprende 18 nodos y 30 tramos, dentro de los cuales hay cinco de peaje. Por su parte, la figura 5.2 ilustra gráficamente esta red.







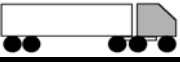


**Figura 5.1**  
**Área de ubicación de la red de prueba**



**Figura 5.2**  
**Esquema de la red de prueba**

Los principales tipos de camión detectados en el EECAN son cinco, tal como se muestra en la tabla 5.1. La tabla 5.2 indica los peajes (para el año 2002) en los cinco tramos de cuota de la red de prueba; mientras que en la 5.3 se presenta la matriz de origen-destino (del acumulado de todos los tipos vehiculares) para un flujo de 9.125 vehículos diarios usado en el modelo de asignación. Esta matriz de origen-destino se desagrega de modo proporcional al tipo de vehículo mediante la composición porcentual dada en la tabla 5.1.

**Tabla 5.1**  
**Los cinco principales tipos de vehículo (basado en Rico et al, 1995; y 1997)**

Tipo	Clasificación	No. de ejes	No. de llantas	Max. PBV (tons)	No. de ESAL	Fracción del tráfico	Configuración
Rígido 2-ejes	C2	2	6	17,5	3,0	39,6%	
Rígido 3-ejes	C3	3	10	26,0	3,8	20,2%	
Artic. 5-ejes	T3S2	5	18	44,0	5,0	22,0%	
Artic. 6-ejes	T3S3	6	22	48,5	6,0	16,3%	
Doble Artic. 9-ejes	T3S2R4	9	34	66,5	4,0	1,9%	

**Tabla 5.2**  
**Peajes (año 2002) para la red de prueba (CAPUFE, 2002)**

Nombre del tramo	De:	A:	Longitud (km)	Tiempo (hh:mm)	Tipo C2	Tipo C3	Tipo T3S2	Tipo T3S3	Tipo T3S2R4
Pto.Mexico - OjoCaliente	5	9	55	00:38	106	106	139	139	179
Monterrey - Reynosa	10	12	200	02:30	210	210	310	310	345
Monterrey - Nuevo Laredo	10	15	224	02:35	223	223	309	309	344
Matamoros - Reynosa	11	12	85	01:00	74	74	111	111	149
Sabinas - Allende	16	17	65	00:39	57	57	85	85	114

**Tabla 5.3**  
**Matriz origen-destino (TDPA) para la red de prueba (basada en Trejo, et al, 1999)**

MATRIZ O-D (vehs.)		D e s t i n o							
Orig	01	04	06	08	10	11	12	15	18
01	---	---	---	---	22	91	18	64	---
04	---	---	---	7	325	56	40	33	---
06	---	---	---	9	462	6	19	44	---
08	---	5	11	---	30	17	44	133	---
10	22	343	440	27	---	567	587	2009	11
11	110	50	0	30	591	---	---	---	---
12	12	41	20	38	591	---	---	8	---
15	73	34	48	188	1842	---	---	---	---
18	---	---	---	---	7	---	---	---	---

## 5.2 Escenarios considerados

La modelación del estudio de caso analizado se basa en el enfoque presentado en el capítulo anterior. El supuesto básico es que tanto los transportistas como el responsable de la carretera tratan de minimizar sus respectivos costos, dados por las ecuaciones (4.4) a (4.6). En virtud de que tanto las características geométricas del camino como las características físicas de los vehículos son fijas y conocidas, el ejercicio de modelación se concentra en tres variables que pueden afectar los costos de las partes que interactúan en la red.

Primeramente, se toma en cuenta el valor del tiempo (VDT). Esta variable entra directamente en los cálculos de costo del transportista, y podría representar diversas valuaciones por los operadores dependiendo de las peculiaridades del movimiento de carga, como es el caso del flujo de bienes perecederos, de materiales peligrosos o de insumos para la manufactura “justo a tiempo”. Desde el punto de vista del responsable de la carretera, la presión que ejerce este valor del tiempo en el transportista actúa como un “factor de colaboración” que apoya su tarea de inducir a los transportistas, a utilizar los caminos con peaje (por lo general con tiempos menores de recorrido que las alternativas libres), contribuyendo así a reducir los gastos de conservación en los tramos de la red libre de peaje. El rango de VDTs utilizado en el modelado va desde valores básicos bajos hasta valores altos del tiempo, que son típicos de los flujos de carga con entregas urgentes.

En segundo lugar, el error aleatorio en la percepción de los costos por los transportistas, resultado de la elección de ruta con el modelo probit, le da mayor realismo al modelado del proceso de decisión de los transportistas, en el cual puede ocurrir que bajo idénticas condiciones de rutas, tipos de vehículo y valores de tiempo, dos operadores distintos elijan rutas diferentes. Dependiendo de la imprecisión de la información disponible para los transportistas, el error en la percepción del costo sobre una ruta determinada cambia; de manera que se obtienen respuestas más parecidas a medida que la incertidumbre disminuye. Este ajuste de la percepción aleatoria del costo se maneja en el modelo con el coeficiente de variación, que determina la varianza en el muestreo de la distribución normal que alimenta la simulación Monte Carlo en el modelo de elección probit.

En tercer lugar se considera la calidad de los materiales de los distintos tipos de caminos. Con base en el amplio rango de resistencia al deterioro de los diversos tipos de camino (p ej, pavimentos flexibles, pavimentos hidráulicos) que se reportan en la literatura, y debido a que en general la calidad de los caminos de peaje es superior a la disponible en los caminos libres de peaje, distintos niveles de calidad del camino en los tramos de cuota y en los tramos libres, se prueban dentro del modelado. Puesto que este punto afecta directamente al costo del responsable de la carretera, y a fin de probar la sensibilidad de sus costos a distintas calidades de camino, se ensayaron diferentes supuestos sobre calidades diferenciales entre caminos de peaje y caminos libres, empezando con variaciones modestas en el costo unitario del deterioro hasta diferencias considerables entre estos tipos de carretera.

Con base en lo anterior, la red de prueba se modeló con dos escenarios:

- a) Un escenario donde el responsable del sistema carretero se encarga del mantenimiento de toda la red, recuperando costos de deterioro del camino con una fracción de la cuota en los tramos de peaje
- b) Un escenario donde el responsable del camino se ocupa solamente de la red libre de peaje, dejando al subsistema de peaje resolver sus propias tareas de conservación, aunque pagando todavía el estímulo económico para desviar vehículos hacia los tramos de cuota

El segundo escenario modelado se acerca más a la práctica carretera en México donde el subsistema de caminos de cuota se maneja por entidades que tienen cierta autonomía (CAPUFE, redes concesionadas); mientras que el planificador federal (DGGC), asume la responsabilidad de conservar la red libre de peaje.

Debido a la incertidumbre para fijar valores particulares de los parámetros del modelado, ambos escenarios se probaron con diversos supuestos en relación con lo siguiente:

1. El valor del tiempo (VDT) de los transportistas, en cuatro niveles. Los cuatro valores del tiempo probados se variaron desde una estimación baja, representativa del movimiento de carga en general que no tiene presión de entregas ágiles, hasta altos valores de tiempo típicos de los flujos que requieren entregas rápidas. El primer nivel usado (etiquetado como VDT1) se estimó con datos de los salarios pagados a operadores de camión para los cinco tipos principales de vehículo detectados en el EECAN: desde \$88,00/h para los camiones C2 hasta \$92,00/h para los camiones T3S2R4. El más alto nivel de VDT (etiquetado como VDT4) fue de \$226,60/h, tomado como referencia de un estudio de valor del tiempo para flujos de carga elaborado en California, E.E.U.U. (Kawamura, 2000) en la misma época a la que corresponden los datos alimentados al modelo, y que es típico de los movimientos de carga con presiones de entrega observados en la frontera norteamericana. Valores intermedios del tiempo, etiquetados como VDT2 y VDT3 se obtuvieron a partir de incrementos del nivel VDT1 en pasos sucesivos del 50% para observar las respuestas intermedias del modelo.
2. El error aleatorio de percepción del costo, en cuatro niveles. Este error aleatorio se tomó en cuenta a través del coeficiente de variación (la razón de la desviación estándar a la media) alrededor del costo medio calculado en cada uno de los tramos de la red de prueba durante la simulación Monte Carlo. Para ejemplificar distintos escenarios de percepción del costo por los operadores, en niveles crecientes de incertidumbre, valores de 10, 15, 20 y 25% de este coeficiente de variación se prueban en el modelo. El primer nivel, del 10%, refleja un pequeño error en la percepción del costo; mientras que el nivel del 25% representa una situación de gran incertidumbre. Con el supuesto de que este error de percepción del costo se distribuye normalmente, por ejemplo, un coeficiente de variación del 10% alrededor de un costo medio de 100 tendría un intervalo de confianza del 95% de entre

80,4 y 119,6; en tanto que el correspondiente intervalo del 85% para un coeficiente de variación del 25%, estaría entre 51 y 149.

3. Los valores de costo unitario de deterioro, en tres niveles. Para el costo unitario de deterioro del camino, el valor de referencia de \$0,10/ESAL-km reportado en un estudio realizado en 1994 por el IMT (Rico, 1995, p.13) se actualizó al año 2002 con el índice de inflación en México (INEGI, 2002), ya que ese año es la referencia de los peajes usados en los datos del modelo. Los valores promedio considerados fueron \$0,25/ESAL-km para caminos de cuota y \$0,53/ESAL-km para los caminos libres de peaje, a fin de reflejar las diferencias cualitativas entre los dos tipos de camino que pudieran afectar al costo de deterioro. Así, por ejemplo, en varios casos el número de carriles disponibles en los caminos libres es menor al que se tiene en los caminos con peaje, lo que permite distribuir el tráfico de carga más ampliamente en estos caminos de cuota; análogamente, la modernización más frecuente de los caminos de cuota es otro factor que reduce los costos del deterioro en esta clase de tramos, como fue el caso de la expansión de tramos importantes de la autopista México-Querétaro de cuatro a seis carriles, y su reconstrucción reemplazando pavimento flexible por concreto hidráulico (SCT, 1988). La diferencia entre los valores promedio de costo unitario de deterioro propuesto, que es \$0,28/ESAL-km se dividió a la mitad para generar el segundo nivel de comparación, y luego se duplicó para realizar el tercer nivel de comparación; esto con el fin de simular tanto un escenario de bajos costos unitarios de daño como uno de altos costos unitarios. Con dichos cálculos, los niveles de comparación resultantes fueron: escenario A (bajo) con \$0,32/ESAL-km para caminos de cuota, y \$0,46/ESAL-km para caminos libres; escenario B (medio) con los costos unitarios \$0,25 y \$0,53 ya descritos; y escenario C (alto) con costos unitarios de daño de \$0,18/ESAL-km para caminos de cuota, y \$0,60 para caminos libres.

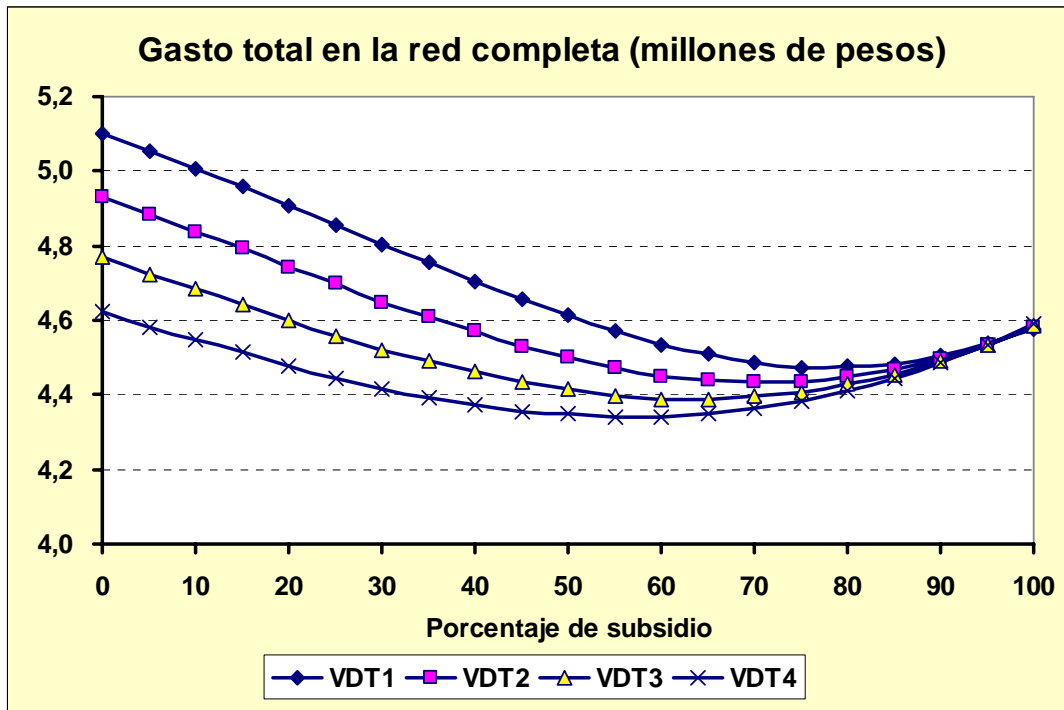
Para los cinco tipos dominantes de camión detectados en el EECAN, se utilizaron costos unitarios de operación vehicular (CUO), de un estudio previo realizado en el IMT (Rico, 1995). Estos valores se basaron en corridas del Modelo de Costos de Operación Vehicular (VOC v.3.0) del Banco Mundial, habiéndose obtenido expresiones para el costo unitario de cada tipo vehicular en función de tres parámetros de operación: la velocidad promedio del camión; el índice internacional de rugosidad (IRI); y la pendiente media de la ruta usada. La ecuación general para el costo unitario de operación vehicular del vehículo tipo  $j$  ( $CUO_j$ ), expresado en miles de pesos por kilómetro, es la siguiente (Rico, et al, 1995, pp. 31-34).

$$UOC_j = a_j + e^{(b_{0j} + b_{1j} * LN(Veloc) + b_{2j} * LN(IRI) + b_{3j} * LN(Pdte + 10))} \quad (5.1)$$

Donde *Veloc* es la velocidad del vehículo en km/h; *IRI* es el índice internacional de rugosidad; y *Pdte* es el porcentaje que representa la pendiente media del tramo. Las constantes  $a_j, b_{0j}, \dots, b_{3j}$  son específicas para cada tipo *j* de vehículo. La particular definición con la que la ecuación (5.1) expresa el costo de operación vehicular parece estar ligado al hecho de que el software VOC del Banco Mundial mencionado genera sus resultados en unidades monetarias por cada 1.000 vehículos-km (Archondo, 1994, pp. 8-9). De este modo se asignaron costos de operación vehicular a cada tramo de la red de prueba, para así incluir los valores en el costo percibido por los transportistas en cada ruta a elegir para sus viajes.

### 5.3 El escenario de la red de prueba completa

La figura 5.3 muestra las curvas del gasto total en que incurre el responsable de la carretera para valores del tiempo, variando desde VDT1 (\$90,00/h en promedio) hasta VDT4(\$221,60/h), con un coeficiente de variación del 10% para el error aleatorio de percepción del costo y los valores promedio de los costos unitarios de deterioro del camino (escenario B), descritos anteriormente.



**Figura 5.3**  
**Gasto total del responsable del camino vs subsidio para varios valores del tiempo**

Los subsidios óptimos resultantes para los valores del tiempo de VDT1 a VDT4 son: 75, 70, 60 y 55% respectivamente. Los correspondientes niveles de gasto total se muestran en la tabla 5.4 junto con el cambio porcentual entre el gasto

original (cuando no se concede descuento) y el gasto óptimo (con el subsidio óptimo).

**Tabla 5.4**  
**Niveles de gasto total para distintos valores del tiempo**

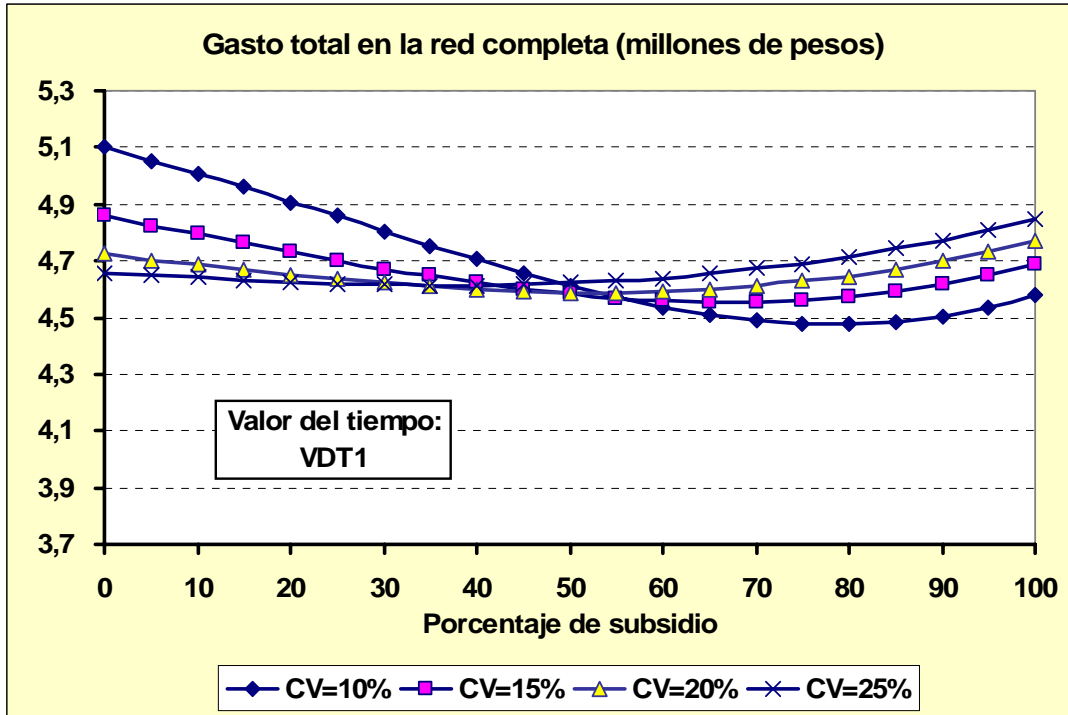
<b>COSTOS DEL ESCENARIO DE RED COMPLETA</b>				
<b>SIN SUBSIDIO</b>	<b>VDT1</b>	<b>VDT2</b>	<b>VDT3</b>	<b>VDT4</b>
Deterioro en tramos de cuota	239.489	328.868	416.070	497.009
Deterioro en tramos libres	4.975.751	4.759.872	4.551.832	4.360.814
Subtotal deterioro:	5.215.241	5.088.740	4.967.901	4.857.822
Subsidio pagado	-	-	-	-
Recuperación de cuotas	115.793	157.018	196.786	233.377
<b>Costo total :</b>	<b>5.099.448</b>	<b>4.931.722</b>	<b>4.771.115</b>	<b>4.624.446</b>
<b>CON SUBSIDIO ÓPTIMO</b>	<b>VDT1</b>	<b>VDT2</b>	<b>VDT3</b>	<b>VDT4</b>
Subsidio óptimo %:	75%	70%	60%	55%
Deterioro en tramos de cuota	1.082.884	1.062.486	995.768	990.237
Deterioro en tramos libres	2.948.198	2.998.462	3.159.750	3.176.128
Subtotal deterioro:	4.031.082	4.060.948	4.155.518	4.166.365
Subsidio pagado	950.525	870.185	698.651	636.205
Recuperación de cuotas	506.947	497.248	465.767	462.695
<b>Costo total :</b>	<b>4.474.660</b>	<b>4.433.884</b>	<b>4.388.402</b>	<b>4.339.876</b>
<b>Porcentaje de ahorro:</b>	<b>12,3%</b>	<b>10,1%</b>	<b>8,0%</b>	<b>6,2%</b>

En las curvas de la figura 5.3 puede verse que a medida que el valor del tiempo para el transportista aumenta, se necesita un menor esfuerzo (en términos del subsidio que se ofrece) para lograr el gasto total mínimo del responsable del camino, lo que implica que los transportistas hacen elecciones de ruta más frecuentes sobre los tramos de cuota, en virtud de los mejores tiempos de recorrido en estas rutas. Esta tendencia se revela en los valores decrecientes tanto de los subsidios óptimos en las curvas como en los niveles del gasto total de estas curvas. La tendencia decreciente de los porcentajes de ahorro de la tabla 5.4 sugiere la existencia de un nivel umbral para el valor del tiempo que daría un 0% de ahorro; esto es, un valor del tiempo para el transportista en el cual ningún descuento sobre las cuotas sería necesario para que el operador elija estas rutas, ya que todos estos transportistas las usarían de cualquier manera. Una simple extrapolación lineal da este valor umbral como \$328,20/h. La tabla 5.4 muestra también una tendencia decreciente tanto en el subsidio pagado como en la fracción del peaje recuperada con el fin de reponer costos a medida que el valor del tiempo aumenta, originada en la disminución del subsidio óptimo que se ofrece.

Por otra parte, en el caso extremo de que el responsable de la carretera ofreciera un subsidio del 100% (eliminación de la cuota), no importa qué valor del tiempo tengan los transportistas; todos elegirán los mejores tiempos de las rutas de peaje, dando un único patrón de flujos, y un solo nivel de gasto; esto se manifiesta en la convergencia de las curvas de la figura 5 en un solo punto cuando el subsidio es 100%. *Para los cuatro niveles de valor del tiempo que se analizaron, el gasto total para el planificador del camino, bajo el esquema de subsidio óptimo siempre es*

menor que el correspondiente gasto original del caso de no ofrecer subsidio alguno.

Respecto al impacto del error aleatorio de percepción del costo por los transportistas, el caso base con valor del tiempo VDT1 (\$90,00/h en promedio) se ensayó con cuatro valores del coeficiente de variación respecto al costo medio: 10, 15, 20 y 25%, obteniéndose los subsidios óptimos de: 75, 65, 55 y 35% respectivamente, como se ilustra en la figura 5.4. Los correspondientes niveles de gasto del responsable del camino se muestran en la tabla 5.5.



**Figura 5.4**  
**Gasto total del responsable del camino vs subsidio para distintos errores de percepción del costo del transportista**

Las curvas en la figura 5.4 tienden a aplanarse a medida que la incertidumbre sobre el costo para el transportista aumenta; esta tendencia sugiere que cuando los operadores perciben sus costos con un alto grado de incertidumbre la información provista por el responsable de la carretera en relación con los subsidios ofrecidos en los tramos de cuota, podría ser de poca utilidad.

Esta tendencia decreciente en los valores del subsidio óptimo que puede apreciarse en la tabla 5.4 sugiere la existencia de un valor umbral para la incertidumbre (medida por el coeficiente de variación), en el cual el subsidio óptimo es cero: es decir, una situación en la que la incertidumbre en la percepción de los costos por los operadores es tan grande, que cualquier información sobre descuentos en los peajes no tiene utilidad alguna para motivarlos a usar las rutas



de cuota. Una simple extrapolación cuadrática de los valores de la tabla 5.5 indica que este valor umbral correspondería a un coeficiente de variación de 26.5%.

**Tabla 5.5**  
**Niveles de gasto total para diferentes errores de percepción del costo por los transportistas**

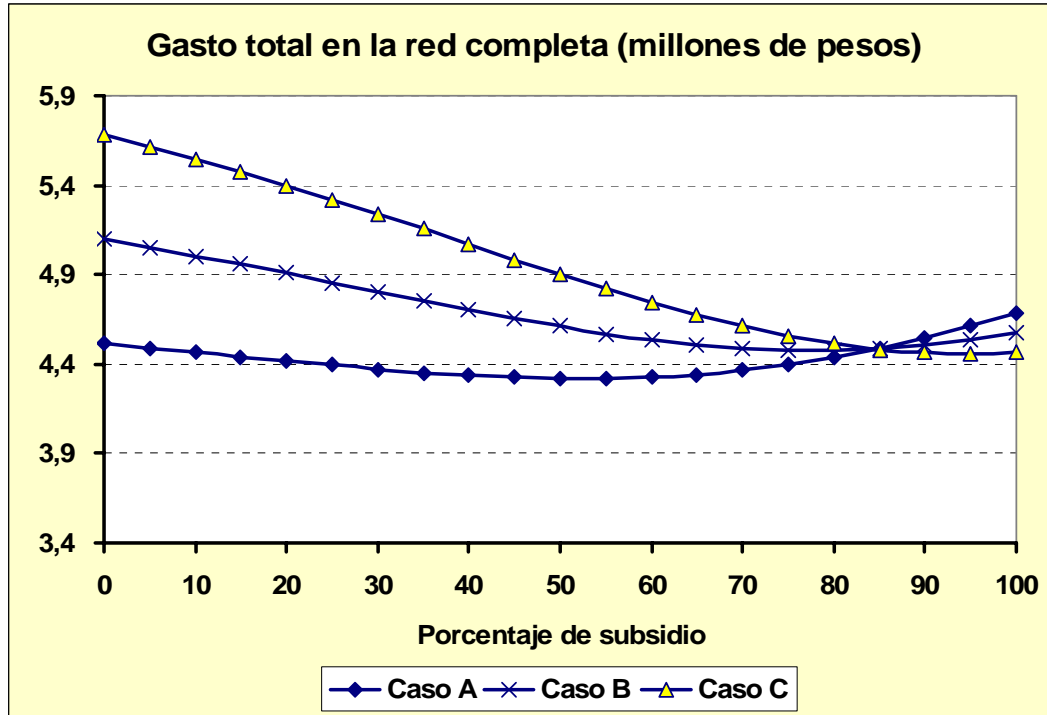
<b>COSTOS DEL ESCENARIO DE RED COMPLETA</b>				
<b>SIN SUBSIDIO</b>	<b>CV=10%</b>	<b>CV=15%</b>	<b>CV=20%</b>	<b>CV=25%</b>
Deterioro en tramos de cuota	239.489	374.030	459.935	513.551
Deterioro en tramos libres	4.975.751	4.664.472	4.480.455	4.386.586
Subtotal deterioro:	5.215.241	5.038.502	4.940.390	4.900.136
Subsidio pagado	-	-	-	-
Recuperación de cuotas	115.793	178.293	217.247	240.945
<b>Costo total :</b>	<b>5.099.448</b>	<b>4.860.209</b>	<b>4.723.143</b>	<b>4.659.192</b>
<b>CON SUBSIDIO ÓPTIMO</b>	<b>CV=10%</b>	<b>CV=15%</b>	<b>CV=20%</b>	<b>CV=25%</b>
Subsidio óptimo %:	75%	65%	55%	35%
Deterioro en tramos de cuota	1.082.884	908.704	812.005	687.739
Deterioro en tramos libres	2.948.198	3.382.658	3.633.904	3.965.544
Subtotal deterioro:	4.031.082	4.291.362	4.445.909	4.653.282
Subsidio pagado	950.525	690.825	521.706	280.948
Recuperación de cuotas	506.947	425.123	379.423	321.083
<b>Costo total :</b>	<b>4.474.660</b>	<b>4.557.064</b>	<b>4.588.192</b>	<b>4.613.147</b>
<b>Porcentaje de ahorro:</b>	<b>12,3%</b>	<b>6,2%</b>	<b>2,9%</b>	<b>1,0%</b>

Los niveles de incertidumbre en la percepción del costo por los transportistas podría reducirse con medidas como mejoras a la señalización en la red carretera, o servicios de información ágiles que el responsable del camino podría implantar como parte de sus tareas de mantenimiento vial. Con base en los resultados de la tabla 5.5, el costo de implantación de estas medidas podría compensarse parcialmente con los ahorros logrados en las reparaciones del camino, por los flujos desviados hacia los tramos de peaje.

En la tabla 5.5 también puede observarse que en el caso de que no se ofrezca subsidio, a medida que la incertidumbre en la percepción del costo para el transportista aumenta, el gasto total para el responsable del camino se reduce, debido a que hay más operadores que perciben el peaje como un bajo costo y por tanto eligen las rutas de cuota.

En el caso de los subsidios óptimos, la tabla 5.5 revela cómo a medida que la incertidumbre en la percepción del costo crece, menor porcentaje de subsidio se requiere para atraer el tráfico de carga hacia los tramos de peaje, ya que de cualquier modo hay más transportistas que perciben las cuotas como un bajo costo. La tendencia decreciente tanto del porcentaje de ahorro en el gasto del responsable del camino como en los subsidios óptimos asociados de la tabla 5.5 ponen de manifiesto el efecto contraproducente que tiene la incertidumbre en la percepción de los costos por parte de los transportistas en la política de subsidio del responsable del camino.

En lo tocante a la sensibilidad al costo unitario de deterioro del camino, la figura 5.5 muestra las curvas de gasto total del responsable de la carretera en los tres casos considerados: caso A, con \$0,46/ESAL-km en los tramos libres y \$0,32/ESAL-km en los de cuota; caso B, (promedio) con \$0,52 y \$0,25 por ESAL-km en los tramos libres y en los de cuota respectivamente; y caso C con los respectivos valores de \$0,60 y \$0,18 por ESAL-km en caminos libres y caminos de cuota, análogo a los casos anteriores. En la tabla 5.6 se incluyen los resultados.



**Figura 5.5**  
**Gasto total del responsable del camino vs subsidio para distintos costos unitarios de deterioro del camino**

Los subsidios óptimos en la figura 5.5 son: 55, 75 y 90% para los casos A, B y C respectivamente. La tendencia creciente de este subsidio óptimo indica, que a medida que las diferencias en el costo unitario de deterioro del camino entre los tramos libres de peaje y los de cuota se vuelve más relevante, ya sea por las menores especificaciones de los caminos libres en comparación con los de peaje, el paso de vehículos de mayores pesos o la práctica de sobrepeso en los camiones de carga, el responsable de la carretera tiene que hacer mayores esfuerzos para atraer el tráfico de carga hacia los tramos de cuota, a fin de mejorar los ahorros en su gasto total de mantenimiento de la red de caminos.

**Tabla 5.6**  
**Niveles de gasto total del responsable del camino para distintos costos unitarios de deterioro del camino**

<b>COSTOS DEL ESCENARIO DE RED COMPLETA</b>			
<b>SIN SUBSIDIO</b>	<b>Caso A</b>	<b>Caso B</b>	<b>Caso C</b>
Deterioro en tramos de cuota	307.104	239.489	172.178
Deterioro en tramos libres	4.326.579	4.975.751	5.624.621
Subtotal deterioro:	4.633.683	5.215.241	5.796.799
Subsidio pagado	-	-	-
Recuperación de cuotas	115.793	115.793	115.793
<b>Costo total :</b>	<b>4.517.890</b>	<b>5.099.448</b>	<b>5.681.006</b>
<b>CON SUBSIDIO ÓPTIMO</b>	<b>Caso A</b>	<b>Caso B</b>	<b>Caso C</b>
Subsidio óptimo %:	55%	75%	95%
Deterioro en tramos de cuota	1.006.755	1.082.884	982.196
Deterioro en tramos libres	3.173.539	2.948.198	2.608.187
Subtotal deterioro:	4.180.294	4.031.082	3.590.383
Subsidio pagado	511.422	950.525	1.500.563
Recuperación de cuotas	371.943	506.947	631.816
<b>Costo total :</b>	<b>4.319.773</b>	<b>4.474.660</b>	<b>4.459.130</b>
<b>Porcentaje de ahorro:</b>	<b>4,4%</b>	<b>12,3%</b>	<b>21,5%</b>

En la tabla 5.6 pueden observarse las tendencias crecientes tanto en el subsidio pagado como en la fracción de cuota para recuperar costos en el caso de los subsidios óptimos.

La tendencia creciente de los ahorros que resultan por el desvío de tráfico hacia los tramos de cuota con el esquema de subsidios óptimos, en comparación con la situación original sin subsidio, sugiere que la política de subsidio resulta más adecuada a medida que los contrastes entre costos unitarios de deterioro de los tramos libres y los de peaje, son más destacados.

## 5.4 El escenario sólo con la red libre de peaje

En el escenario mostrado en la sección 5.3, el supuesto fue que el responsable de la carretera asumía la responsabilidad del mantenimiento de toda la red de prueba, teniendo oportunidad de recibir una fracción del peaje en el subsistema de cuota para reponer sus costos.

En esta sección, el supuesto cambia a considerar que el responsable del camino se ocupa solamente del mantenimiento de los tramos libres de peaje, dejando al subsistema de peaje enfrentar sus propios problemas de conservación; por tanto, no tiene recuperación alguna de los peajes, aunque sigue asumiendo el pago del estímulo económico para alentar el desvío de tráfico hacia el subsistema de caminos de cuota. En comparación con el escenario de la sección 5.3, la red que mantiene el responsable del camino es más pequeña; mientras que la red de prueba completa cubre 4.000 km, los tramos libres de peaje comprenden sólo

3.371km, lo que significa una reducción del 16% en la longitud de la infraestructura.

Con base en un proceso análogo al de la sección 5.3, en la figura 5.6 se muestra el gasto total de mantenimiento en los cuatro niveles de valor del tiempo referidos anteriormente, con el desglose de gasto de la tabla 5.7.

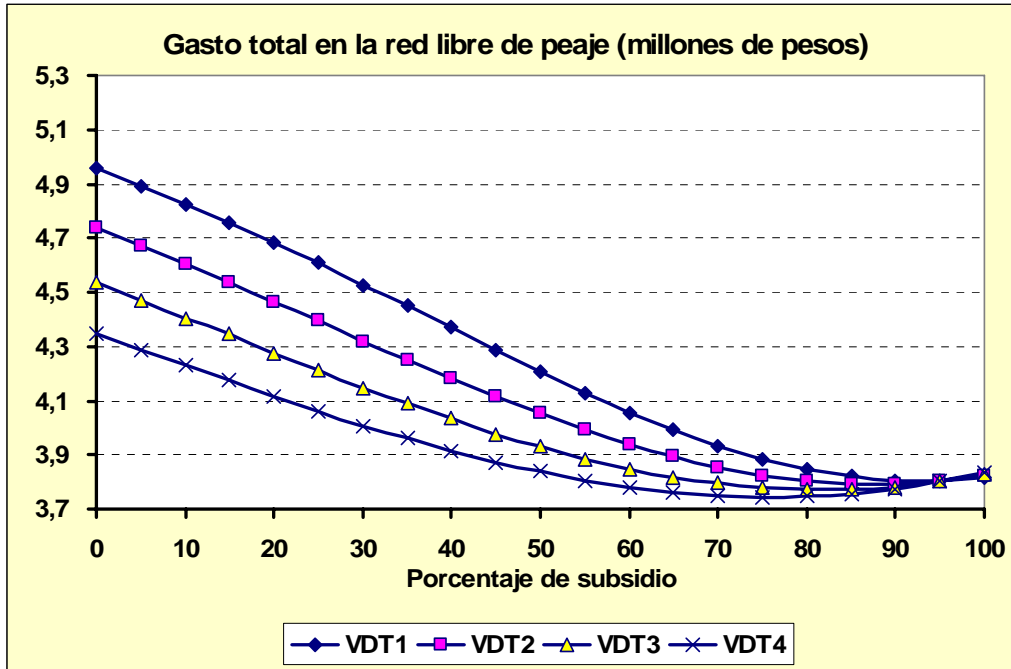


Figura 5.6

Gasto total del responsable del camino vs subsidio para distintos valores del tiempo. Sólo en la red libre de peaje

Tabla 5.7

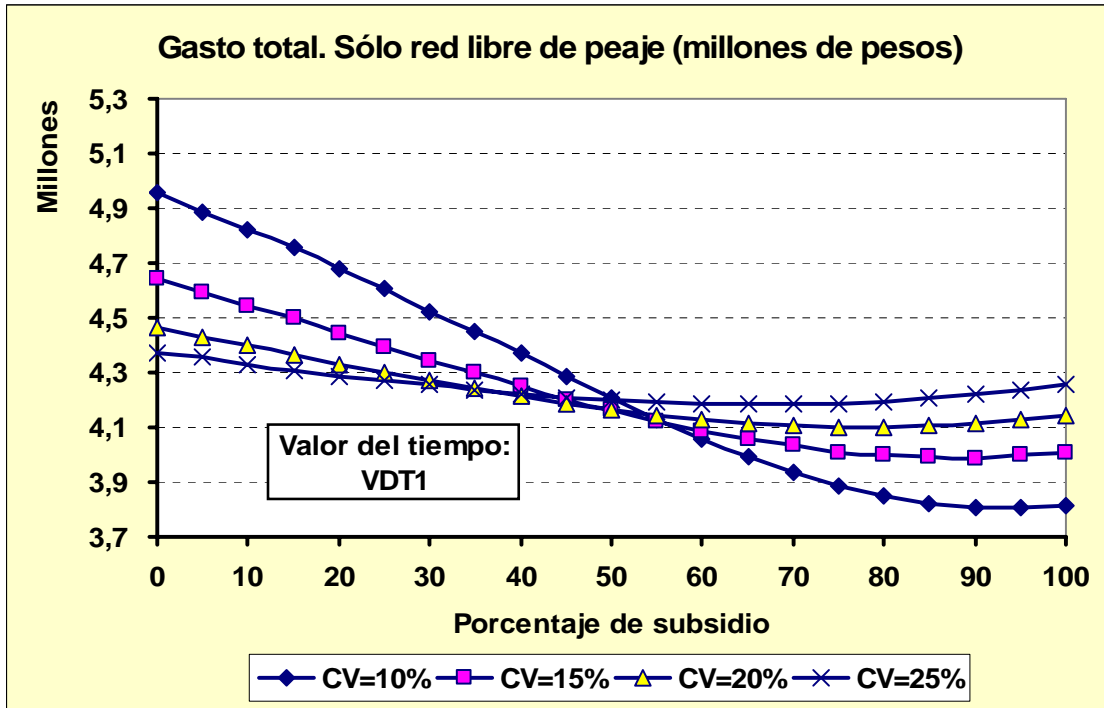
Niveles de gasto total del responsable del camino para distintos valores del tiempo. Sólo en la red libre de peaje

COSTOS DEL ESCENARIO SOLO CON LA RED LIBRE				
SIN SUBSIDIO	VOT1	VOT2	VOT3	VOT4
Deterioro en tramos de cuota	227.538	306.359	379.837	444.865
Deterioro en tramos libres	4.727.441	4.434.089	4.155.436	3.903.302
Subtotal deterioro:	4.954.979	4.740.448	4.535.272	4.348.167
Subsidio pagado	-	-	-	-
<b>Costo total :</b>	<b>4.954.979</b>	<b>4.740.448</b>	<b>4.535.272</b>	<b>4.348.167</b>
CON SUBSIDIO ÓPTIMO	VOT1	VOT2	VOT3	VOT4
Subsidio óptimo %:	90%	90%	85%	75%
Deterioro en tramos de cuota	847.961	849.420	841.883	823.378
Deterioro en tramos libres	1.599.602	1.573.579	1.677.508	1.881.765
Subtotal deterioro:	2.447.564	2.422.999	2.519.391	2.705.143
Subsidio pagado	1.357.509	1.368.924	1.252.508	1.036.794
<b>Costo total :</b>	<b>3.805.073</b>	<b>3.791.923</b>	<b>3.771.899</b>	<b>3.741.937</b>
<b>Porcentaje de ahorro:</b>	<b>23,2%</b>	<b>20,0%</b>	<b>16,8%</b>	<b>13,9%</b>

Tanto en la figura 5.6 como en la tabla 5.7 se observan tendencias similares a las del correspondiente caso del escenario con la red de prueba completa; sin embargo, al ser la red libre de peaje de menor longitud se obtienen niveles más bajos en el gasto total. Esta característica se mantiene para el caso en que no se aplica subsidio, y también en el caso de los subsidios óptimos.

Los correspondientes subsidios óptimos para los valores del tiempo de VDT1 a VDT4 en la figura 5.6 son: 90, 90, 85 y 75% respectivamente. Del mismo modo que en el caso de la red de prueba completa, a mayores valores del tiempo corresponden menores esfuerzos para atraer tráfico hacia los tramos de peaje.

Las curvas del gasto total para variaciones en el error de percepción del costo por los transportistas se ilustra en la figura 5.7, con los niveles de gasto de la tabla 5.8.



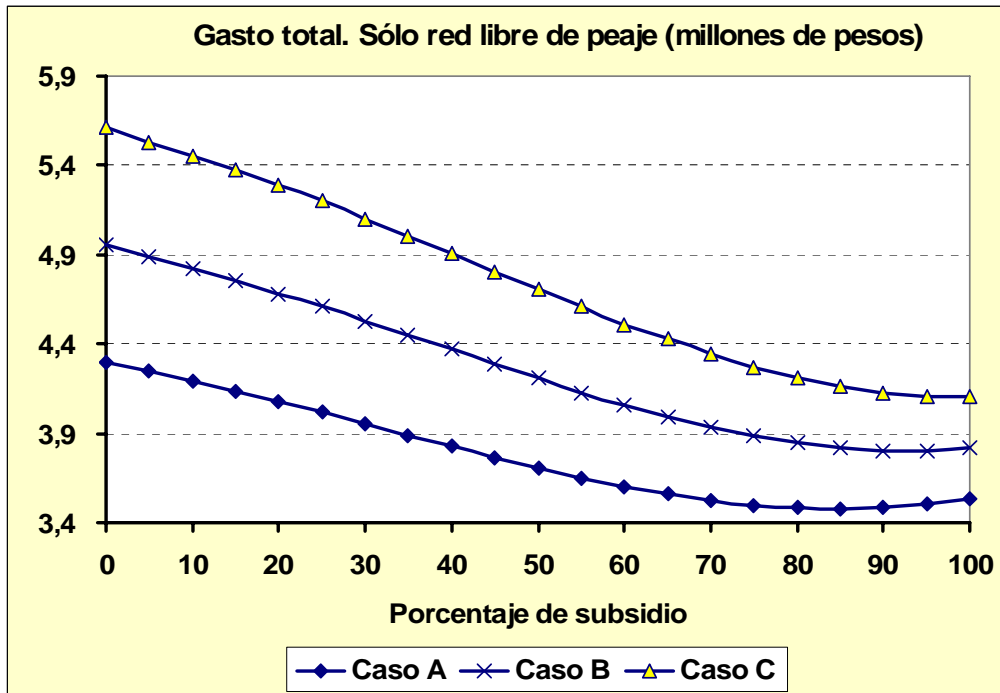
**Figura 5.7**  
**Gasto total del responsable del camino vs subsidio para distintos errores de percepción del costo. Sólo en la red libre de peaje**

El comportamiento de estas curvas es semejante al caso en el que el responsable de la carretera asume la responsabilidad de toda la red, observándose también menores niveles del gasto debido a que se maneja una red más corta.

**Tabla 5.8**  
**Niveles de gasto total del responsable del camino para distintos errores de percepción del costo. Sólo en la red libre de peaje**

<b>COSTOS DEL ESCENARIO SOLO CON LA RED LIBRE</b>				
<b>SIN SUBSIDIO</b>	<b>CV=10%</b>	<b>CV=15%</b>	<b>CV=20%</b>	<b>CV=25%</b>
Deterioro en tramos de cuota	227.538	344.679	415.383	458.136
Deterioro en tramos libres	4.727.441	4.298.431	4.046.458	3.913.248
Subtotal deterioro:	4.954.979	4.643.109	4.461.841	4.371.384
Subsidio pagado	-	-	-	-
<b>Costo total :</b>	<b>4.954.979</b>	<b>4.643.109</b>	<b>4.461.841</b>	<b>4.371.384</b>
<b>CON SUBSIDIO ÓPTIMO</b>	<b>CV=10%</b>	<b>CV=15%</b>	<b>CV=20%</b>	<b>CV=25%</b>
Subsidio óptimo %:	75%	90%	80%	60%
Deterioro en tramos de cuota	847.961	822.565	765.571	677.995
Deterioro en tramos libres	1.599.602	1.942.281	2.396.060	2.921.785
Subtotal deterioro:	2.447.564	2.764.847	3.161.631	3.599.780
Subsidio pagado	1.357.509	1.223.459	938.449	583.920
<b>Costo total :</b>	<b>3.805.073</b>	<b>3.988.306</b>	<b>4.100.080</b>	<b>4.183.700</b>
<b>Porcentaje de ahorro:</b>	<b>23,2%</b>	<b>14,1%</b>	<b>8,1%</b>	<b>4,3%</b>

Finalmente, para el caso del deterioro del camino, la figura 5.8 y la tabla 5.9 muestran los resultados para la red libre de peaje, notándose las mismas tendencias observadas en la figura 5.5, con menores niveles de gasto total, aunque con mayores niveles de subsidio óptimo.



**Figura 5.8**  
**Gasto total del responsable del camino vs subsidio para distintos costos unitarios de daño al camino. Sólo en la red libre de peaje**

**Tabla 5.9**  
**Niveles de gasto total del responsable del camino para distintos costos unitarios de daño al camino. Sólo en la red libre de peaje**

<b>COSTOS DEL ESCENARIO, SOLO CON LA RED LIBRE</b>			
<b>SIN SUBSIDIO</b>	<b>Caso A</b>	<b>Caso B</b>	<b>Caso C</b>
Deterioro en tramos de cuota	285.034	227.538	166.612
Deterioro en tramos libres	4.015.514	4.727.441	5.442.798
Subtotal deterioro:	4.300.548	4.954.979	5.609.411
Subsidio pagado	-	-	-
<b>Costo total :</b>	<b>4.300.548</b>	<b>4.954.979</b>	<b>5.609.411</b>
<b>CON SUBSIDIO ÓPTIMO</b>	<b>Caso A</b>	<b>Caso B</b>	<b>Caso C</b>
Subsidio óptimo %:	85%	90%	100%
Deterioro en tramos de cuota	925.691	847.961	724.412
Deterioro en tramos libres	1.334.438	1.599.602	1.733.318
Subtotal deterioro:	2.260.129	2.447.564	2.457.730
Subsidio pagado	1.215.665	1.357.509	1.646.259
<b>Costo total :</b>	<b>3.475.794</b>	<b>3.805.073</b>	<b>4.103.988</b>
<b>Porcentaje de ahorro:</b>	<b>19,2%</b>	<b>23,2%</b>	<b>26,8%</b>

Los correspondientes subsidios óptimos de la figura 5.8 para los casos A, B y C son: 85, 90 y 100%. En particular, el valor del 100% no se localiza precisamente en el mínimo geométrico de la curva, sino corresponde al mayor valor del subsidio modelado.

Los resultados mostrados reflejan cómo el responsable de la carretera tiene que hacer mayor esfuerzo para desviar el tráfico de carga hacia los tramos de cuota, cuando los costos unitarios de daño en la infraestructura libre de peaje son muy altos. El último subsidio óptimo de 100%, correspondiente al caso C indica que con costos de deterioro muy elevados en los tramos libres de peaje, cualquier elección alterna entre un camino libre de peaje y uno de cuota debería desalentarse por completo, aun pagando como estímulo el 100% de la cuota para favorecer la circulación por este último tramo.

Un efecto inmediato de estas interacciones entre el responsable del camino y el usuario, se nota en los patrones de flujo vehicular en la red carretera antes y después de la implantación del esquema de subsidio. La tabla 5.10 muestra los cambios observados en el ejercicio de simulación para los cinco tramos de cuota incluidos en la red de prueba utilizada, antes y después de la aplicación del subsidio óptimo en el caso en que el responsable del camino atiende la red completa, usando el caso base (con valor del tiempo VDT1) ya referido en la figura 5.3.

**Tabla 5.10**  
**Patrones de flujo vehicular en los tramos de cuota de la red de prueba. Antes y después del subsidio óptimo. Caso de la red completa**

ESCENARIO DE RED COMPLETA			Sin subsidio		Subsidio óptimo		% de cambio	
Tramo	Orig	Dest	Ida	Regreso	Ida	Regreso	Ida	Regreso
Pto.Mexico - Ojo Caliente	5	9	24	26	99	107	413%	412%
Monterrey - Reynosa Cuota	10	12	190	195	879	902	463%	463%
Monterrey - N.Laredo Cuota	10	15	204	196	1340	1275	657%	651%
Matamoros - Reynosa Cuota	11	12	394	374	646	607	164%	162%
Nva. Rosita - Allende Cuota	16	17	0	0	0	0	---	---
Total:			812	791	2964	2891	365%	365%

La tabla 5.10 muestra claramente el incremento en los flujos vehiculares sobre los tramos de peaje de la red de prueba, cuando se considera el esquema óptimo de subsidio. El notable incremento de flujo promedia un 365% para los flujos vehiculares en ambos sentidos de circulación. Respecto al flujo total de 9.125 vehículos que se modelaron en la red de prueba antes de la aplicación del esquema de subsidio óptimo, los tramos de cuota tenían  $812 + 791 = 1.603$  vehículos (17,6% del total); mientras que bajo el esquema de subsidio óptimo el flujo en los tramos de cuota se incrementa a  $2.964 + 2.891 = 5.855$  vehículos (64,2% del total).

En dicha tabla también se hace evidente el flujo nulo del último tramo de cuota ("Nueva Rosita – Allende Cuota", del nodo 16 al nodo 17); esta característica está ligada al escaso flujo que va y viene del nodo 18, el cual usa otros tramos para hacer los movimientos.

En el caso en que el responsable de la carretera atiende únicamente los tramos libres de peaje, la tabla 5.11 muestra los resultados exhibiendo características semejantes a la tabla 5.10.

**Tabla 5.11**  
**Patrones de flujo vehicular en los tramos de cuota de la red de prueba. Antes y después del subsidio óptimo. Caso sólo con la red libre**

ESCENARIO RED LIBRE			Sin subsidio		Subsidio óptimo		% de cambio	
Tramo	Orig	Dest	Ida	Regreso	Ida	Regreso	Ida	Regreso
Pto.Mexico - Ojo Caliente	5	9	24	26	117	128	488%	492%
Monterrey - Reynosa Cuota	10	12	190	195	1036	1067	545%	547%
Monterrey - N.Laredo Cuota	10	15	204	196	1646	1578	807%	805%
Matamoros - Reynosa Cuota	11	12	394	374	672	630	171%	168%
Nva. Rosita - Allende Cuota	16	17	0	0	0	0	---	---
Total:			812	791	3471	3403	427%	430%

En este escenario, el tráfico en los tramos de cuota si no hay subsidio alguno, es igual al del escenario anterior: 1.603 vehículos; mientras que bajo el esquema de subsidio óptimo el flujo en los tramos de cuota se incrementa a  $3.471 + 3.403 = 6.874$  vehículos (75,3% del total).



El nuevo tráfico sobre los tramos de peaje, además de significar un ahorro en el gasto total de mantenimiento para el responsable de la red carretera, implica directamente un mayor número de transacciones en el subsistema de caminos de cuota. Esto origina un aumento del ingreso para el subsistema de cuota, lo que le permite enfrentar mejor las tareas de mantenimiento, y a la vez genera una mayor recaudación fiscal a través del IVA por el peaje, lo que indirectamente beneficia la política fiscal del sector central.



## 6 Conclusiones y recomendaciones

---

Mucho de la investigación en el autotransporte de carga ha considerado implícitamente a actores individuales: los hombres-camión moviendo carga sobre el sistema carretero; los cargadores que organizan los embarques; los productores que fabrican diversidad de mercancías que requieren transporte; los consumidores que generan una demanda para los productos, induciendo así una demanda de transporte; las empresas transportistas que mueven sus flotas en la red de caminos o los automóviles dentro de los flujos urbanos congestionados compartiendo la red vial con los camiones de carga.

Los impactos con mayor frecuencia citados en la literatura han sido: congestión, accidentes, contaminación ambiental y ruido; que han centrado la atención de los planificadores en el área de seguridad y medio ambiente.

Un rasgo común a todos estos enfoques es que dan por sentado la existencia de un camino para realizar el transporte. El camino se supone dado de forma implícita como un elemento disponible para el transporte, pero muy poco suele discutirse acerca de su calidad y su durabilidad. Los caminos, sin embargo, se degradan con el paso de los flujos de camiones de carga, y requiere reparaciones y mantenimiento. Esta circunstancia justifica considerar al planificador o responsable de la carretera como otro actor más, que tiene interés en el tráfico de carga. En este sentido, el responsable del camino no debería limitarse a la actitud de brindar un buen servicio, y a su compromiso con el mantenimiento de la calidad de los caminos en niveles aceptables, sino que podría extenderse hacia una actitud de iniciativas que guíen las respuestas de los usuarios de la carretera, hacia el objetivo del interés social que implícitamente está contenido en la protección y preservación del sistema carretero.

De esta forma, sin considerar nuevas medidas impositivas o nuevos peajes que pudieran reducir el bienestar social de los usuarios de la infraestructura, y buscando aplicar sus recursos de la mejor manera, el responsable del camino adopta un esquema de incentivo económico que alienta a los camiones de carga a desviarse hacia los tramos con peaje. Tanto el modelo presentado como el ejemplo ilustrativo de la sección 4.4 sugieren que esta política de subsidio puede tener sentido en el propósito de reducir el gasto total del responsable del camino que enfrenta el problema de conservación vial.

Los costos de los transportistas que buscan su mejor ruta, y los costos del responsable del camino que repara la red carretera, guían al modelo en la búsqueda de un subsidio óptimo que produzca el gasto total mínimo para el responsable del camino. Luego de cubrir los costos de deterioro del camino derivado del flujo vehicular, hacer los pagos derivados del esquema de subsidio y recuperar una fracción del peaje en los tramos de cuota, el esquema de subsidio

presentado parece ofrecer mejores resultados que la política original de no hacer nada.

Una extensión al modelo referido podría tenerse al incorporar representaciones dinámicas (cambiantes con el tiempo) de algunas de las variables utilizadas en el modelo, una vez que los datos necesarios y las formulaciones matemáticas adecuadas para estas variables se pudieran establecer; esta posibilidad indica una línea futura de investigación.

El estudio de caso que se presenta en la red carretera de prueba sugiere que el esquema de subsidio puede reducir los niveles de gasto dedicados al mantenimiento de la red de caminos, en comparación con la situación original de no ofrecer subsidio alguno. Los ensayos numéricos realizados indican que los factores que parecen mejorar la posición del responsable de la carretera son: altos valores del tiempo para los transportistas; bajos niveles de incertidumbre de percepción del costo del viaje por los operadores; y bajos costos unitarios de deterioro a la infraestructura de los caminos.

Respecto al valor del tiempo, resulta evidente que se requieren más estudios y evaluaciones de este valor para el transporte de carga en México, dado el importante papel que este parámetro tiene en la modelación de los flujos vehiculares.

El efecto de la incertidumbre acerca del costo de operación para el transportista podría reducirse con algunas acciones del responsable del camino tales como mejoras a la señalización o servicios de información, de modo que los transportistas pudieran percibir más claramente los beneficios del uso de la infraestructura de peaje.

En cuanto a los escenarios para los distintos costos unitarios de daño al pavimento mostrado en el capítulo 5, puede verse que el gasto total del responsable del camino es altamente sensible a las variaciones de este parámetro. Dicho punto en particular se relaciona con el problema de la sobrecarga en el autotransporte de carga, que incrementa notablemente los costos de deterioro. Esto indica una línea de investigación futura para el problema.

Finalmente, los patrones de flujo resultantes de aplicar el subsidio óptimo significan mayores flujos en el subsistema de cuota, con el consecuente incremento de captación de peaje y a la vez de recaudación del IVA.

Este incremento en la recaudación fiscal, junto con el beneficio de la reducción de los niveles de gasto para el responsable del camino se logra con el modelo de subsidios sin alterar la estructura tarifaria del subsistema de peaje, lo que representa un impacto positivo en el bienestar social general al extender las posibilidades del sector central, para mejoras en otras áreas prioritarias como la salud, la educación, o el transporte mismo.





# Bibliografía

---

Abbas, K.A., and Bell, M.G.H. (1994). System dynamics applicability to transportation modelling. *Transportation Research A*. Vol. 28A. No. 5, pp. 373-400.

Addis, R.R. and Whitmarsh, R.A. (1981). *Relative damaging power of wheel loads in mixed traffic*. Transport and Road Research Laboratory. Report LR 979. UK, pp. 1-11.

AFD. (2005). *La redevance sur le trafic des poids lourds liée aux prestations (RPLP)*. [online]. Administration Fédérale des Douanes, Impôts et Redevances (AFD), RPLP. Disponible en: <URL: [http://www.ezv.admin.ch/zollinfo\\_firmen/steuern\\_abgaben/00379/index.html?lang=fr](http://www.ezv.admin.ch/zollinfo_firmen/steuern_abgaben/00379/index.html?lang=fr)> [Consultado en oct/ 2005].

Allemand, F. (2005). *La politique européenne des transports : l'imperatif d'une relance des investissements*. Le Supplément de la Lettre No. 215. Fondation Robert Schuman. L'Europe en Actions. Juin 2005. [en línea]. Disponible en: <URL: <http://www.robert-schuman.org/supplement/sup215.pdf>>. [consultado: Nov/2005]

American Association of State Highway Officials (AASHO). (1962). *Road Test – Report 5 (Pavement Research)*. Highway Research Board, Washington, Special Report 61E. (quoted in Fowkes, Nash and Tweddle, 1988, p.16-17).

Archondo-Callao, R.S. and Faiz, A. (1994). *Estimating Vehicle Operating Costs*. World Bank Technical Paper No. 234. Washington, D.C.

Arroyo-O, J.A. and Aguerrebere-S, R. (2002). (in Spanish) *Estado superficial y costos de operación en carreteras* (Surface condition and highway operating costs). Pub. Tec. No. 202. Mexican Transportation Institute (IMT). Mexico.

ASFiNAG. (2005). *Tolling Regulations for the Motorways and Expressways of Austria*. ASFiNAG (Autobahnen- und Schnellstraßen- Finanzierungs- Aktiengesellschaft. [en línea]. Disponible en: <[http://www.asfinag.at/maut/maut\\_neu/mautordnung/Version%2010/Englisch/Mautordnung%20Version%2010%20Endversion.pdf](http://www.asfinag.at/maut/maut_neu/mautordnung/Version%2010/Englisch/Mautordnung%20Version%2010%20Endversion.pdf)>. [consultado: Nov/2005]

Bell, M.G.H. and Iida, Y. (1997). *Transportation Network Analysis*. John Wiley & Sons. Chichester, pp. 193-204.

Benekohal, R.F.; El-Zohairy, Y.M.; Forrler, E.; Aycin, M.F. (1999). Truck delay and traffic conflicts around weigh stations. *Transportation Research Record*. No. 1653, pp. 52-60.

Borowski, E.J. and Borwein, J.M. (1989). *Collins Dictionary of Mathematics*. Harper Collins Publishers. UK.

Bosch, R. (2000). *Automotive Handbook*. 5<sup>th</sup> Edition. Robert Bosch GmbH. Germany.

Cambridge Systematics, Inc. & Reebie Associates, Inc. (2000). *Freight Systems: From System Construction to System Optimization*. [online]. FHWA Office of Operations.

Working Papers on Freight Themes. Disponible en:

<URL:[http://www.ops.fhwa.dot.gov/freight/theme\\_papers/theme\\_paper\\_index.htm](http://www.ops.fhwa.dot.gov/freight/theme_papers/theme_paper_index.htm)>

[Consultado en Feb/ 2003].

Casavant, K.L. and Lenzi, J. (1993). An economic evaluation of the fee and fine structure for overloaded trucks in Washington. *Transportation Quarterly*. Vol. 47. No. 2. pp. 281-294.

Cebon, D.(1993). *Interaction between heavy vehicles and roads*. Transportation Research Group, University of Cambridge. [online]. Disponible en:<URL: [http://www-mech.eng.cam.ac.uk/trg/publications/downloads/veh\\_road/veh\\_road11.pdf](http://www-mech.eng.cam.ac.uk/trg/publications/downloads/veh_road/veh_road11.pdf) >. [Consultado en Abr/ 2003].

Checkland, P. and Scholes, J. (1999). *Soft systems methodology in action*. John Wiley & Sons. UK, pp. 45-47.

Civic Trust, County Surveyors Society, Department of Transport. (1990). *Lorries in the community*. Civic Trust. London, pp. 8-9.

CORDIS (1997). *WORKFRET. Working Cultures in the Face of Intermodal Freight Transport Systems*. [online]. Transport RTD Programme. Strategic research. Disponible en: <URL:<http://www.cordis.lu/transport/src/workfret.htm> >. [Consultado en Feb/ 2003].

Cunagin, W., Mickler, W.A. and Wright, C.(1997) Evasion of weight-enforcement stations by trucks. *Transportation Research Record* 1570, 181-190.

Daellenbach, H.G.(1997) *Systems and Decision Making*. John Wiley & Sons.

Dalbert, T. (2001). Swiss heavy vehicle fees launched. ITS International. January-February 2001. pp. 53-54.

Department for Transport. (1997). Lorry weights – a consultation document. [online]. Department for Transport, London. Disponible en: <URL: [http://www.dft.gov.uk/stellent/groups/dft\\_roads/documents/page/dft\\_roads\\_506832.hcsp](http://www.dft.gov.uk/stellent/groups/dft_roads/documents/page/dft_roads_506832.hcsp)>. [Consultado en Feb/ 2004].

Durán, G., Gutiérrez, J.L. and Mendoza, A. (1996) *Estudio de Pesos y Dimensiones de los Vehículos de Carga que Circulan por las Carreteras Nacionales. Análisis Estadístico de la Información Recopilada en las Estaciones Instaladas en 1994*. (in Spanish). (Weight and Size Field Study of Vehicles Running on National Highways. Statistical Analysis of Data Gathered in Stations Settled in 1994). Doc. Téc. No. 18. Instituto Mexicano del Transporte. Mexico.

Dutz, M., Hayri, A. and Ibarra, P. (2000). *Regulatory reform, competition and innovation. A case study of the Mexican Road Freight Industry*. [online] World Bank Research -Working Papers. Report No. 2318. Disponible en: <URL: <http://econ.worldbank.org/view.php?type=5&id=1073> > [Consultado en Feb/ 2003]

Euritt, M.A. (1987). Economic factors of developing fine schedules for overweight vehicles in Texas. *Transportation Research Record* 1116. pp. 36-37.

European Commission. (1993). *Charging: Eurovignette and the agreement with Switzerland*. [online]. EUROPA. The European Union on Line. Activities-Transport-Road



- Transport. Disponible en: <URL: [http://europa.eu.int/comm/transport/themes/land/english/lt\\_12\\_en.html](http://europa.eu.int/comm/transport/themes/land/english/lt_12_en.html) >. [Consultado en Feb/ 2003].
- European Commission. (1998). *Fair Payment for Infrastructure Use: A phased approach to a common transport infrastructure charging framework in the EU*. [online]. Disponible en: <URL: <http://europa.eu.int/comm/transport/infr-charging/library/lb98-en.pdf> >. [Consultado en Mar/ 2003].
- European Commission. (1999). *SOFTICE. Survey on Freight Transport Including Cost Comparison for Europe. Final Report for Publication*. [online]. Disponible en: <URL: [http://europa.eu.int/comm/transport/extra/final\\_reports/road/Softice.pdf](http://europa.eu.int/comm/transport/extra/final_reports/road/Softice.pdf) >. [Consultado en Abr/ 2003].
- European Commission. (2002). *European Union. Energy & Transport in Figures 2002*. Directorate-General for Energy and Transport. Brussels, Belgium.
- Ferrari, P. (2002). *A three-level programming model of road pricing*. [online] Disponible en: <URL: >. [Consultado en Mar/2004].
- FHWA, (2002). *Freight Analysis Framework (FAF)*. [online]. US DOT Federal Highway Administration (FHWA). Office of Freight Management & Operations. Disponible en: <URL: <http://www.ops.fhwa.dot.gov/freight/publications/faf.html> >. [Consultado en Feb/2003].
- Fisk, C.S. (1984). Game theory and transportation systems modelling. *Transportation Research B*. Vol. 18, No. 4/5, pp. 301-313.
- Fowkes, A.S., Nash, C.A. and Tweddle, G. (1988). *Taxation of road goods vehicles : an economic assessment*. ITS Working Paper 269. University of Leeds, Institute for Transport Studies. Leeds, Yorkshire, UK.
- FTA Online (2003). *New German distance related motorway toll scheme*. [online]. Freight Transport Association. Disponible en: <URL: <http://www.fta.co.uk/information/briefing-digest/briefingnotes/030827motorwaytoll.htm> >. [Consultado en Ene/ 2004].
- Greenberg, H.J. (2001). *Mathematical Programming Glossary*. [online]. Disponible en: URL: <http://www.cudenver.edu/~hgreenbe/glossary/intro.html> >. [Consultado en abr/ 01]
- Green Car Congress. Energy, Technologies, Issues and Policies for Sustainable Mobility (2005). *Pay-per-Mile in California?* [en línea]. Disponible en: [URL: <http://www.greencarcongress.com/2004/11/paypermile\\_in\\_c.html>](http://www.greencarcongress.com/2004/11/paypermile_in_c.html). [Consultado en nov/05]
- Gutiérrez, J.L; Mendoza, A. and Dontchev, P. (1999) *Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional. Análisis Estadístico de la Información Recopilada en las Estaciones Instaladas en 1995 y 1996*. (in Spanish) (Field Statistical Study of National Road Freight Transport. Statistical Analysis of Data Gathered in Stations Settled in 1995 and 1996). Doc. Téc. No. 20. Instituto Mexicano del Transporte. Mexico.
- Gutiérrez, J.L. and Mendoza, A. (2000). *Estudio estadístico de campo del autotransporte nacional. Análisis estadístico de la información recopilada en las estaciones instaladas en 1997*. (in Spanish). (National road freight transportation statistical field study. Statistical

analysis of survey data 1997). Doc. Téc. No. 21. Instituto Mexicano del Transporte. México.

Gutiérrez, J.L. and Mendoza, A. (2002). *Estudio estadístico de campo del autotransporte nacional. Análisis estadístico de la información recopilada en las estaciones instaladas en 2001* (in Spanish). (National road freight transportation statistical field study. Statistical analysis of survey data 2001). Doc. Téc. No. 28. Instituto Mexicano del Transporte. México.

Gwilliam, K.M. (1997). *The value of time in economic evaluations of transport projects*. The World Bank Infrastructure Notes. Transport No. OT-5. [online]. Disponible en: <URL: <http://www.worldbank.org/transport/publicat/td-ot5.htm>>. [Consultado en Apr 2003].

Hajek, J.J. and Billing, J.R. (2002). Trucking trends and changes that affect pavements. *Transportation Research Record*. No. 1816, pp. 96-103.

Harik, I.E., et al. (1990). United States bridge failures, 1951-1988. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. Vol. 4, No. 4. Nov 1990. pp. 272-277.

Hollander, Y., Prashker, J. N. and Mahalel, D., "Determining the Desired Amount of Parking using Game Theory", Technion - Israel Institute of Technology, Haifa, Israel, 2003. Presented on 23/Jan/2004 at the internal Friday Seminar, Institute for Transport Studies, University of Leeds, Leeds, UK.

Hotmix. (2004). *HOTMIX DATABASE. AASHO Road Test*. [online]. Disponible en: <URL: [http://hotmix.ce.washington.edu/wsdot\\_web/Modules/06\\_structural\\_design/aasho\\_road\\_test.htm](http://hotmix.ce.washington.edu/wsdot_web/Modules/06_structural_design/aasho_road_test.htm)>. [Consultado en Abr/ 2004].

IMT (2001). *Manual Estadístico del Transporte 2001*. (in Spanish). [online]. Instituto Mexicano del Transporte. (Statistical Transportation Handbook 2001. Mexican Transportation Institute. (IMT)). Disponible en: <URL: <http://www.imt.mx>>. [Consultado en: Feb/ 2003].

Lamm, R., Psarianos, B. and Mailaender. (1999). *Highway design and traffic safety engineering handbook*. McGraw-Hill. USA, pp. 13.1- 13.3.

Levins, C. and Ockwell, A. (2000). *Trucks: the road to ruin or increased efficiency? How can freight trucks be made heavier and still reduce damage and cut transport costs? The answer may be divine*. OECD Observer. [online]. Disponible en: <URL: <http://www.oecdobserver.org/news/fullstory.php/aid/236/Trucks: the road to ruin or increased efficiency .html>>. [Consultado en Sep/ 2003].

Lowe, D. (2002). *The transport manager's & operator's handbook 2002*. 32<sup>nd</sup> edition. Kogan Page Ltd. London, p.285-286.

ODOT, Oregon Department of Transportation. (2005). *2004 Transportation Key Facts / Current Issues and Initiatives / Road User Fee Task Force*. [en línea]. Disponible en: <URL: [http://www.oregon.gov/ODOT/COMM/docs/key\\_facts/12ruff.pdf](http://www.oregon.gov/ODOT/COMM/docs/key_facts/12ruff.pdf)> [Consultado en nov/05].

OECD. (1988). *Freight Vehicle Overloading and Load Measurement*. OECD Road Transport Research Programme. Published by the Transport & Road Research Laboratory. Crowthorne, UK.

OECD. (1998). *Dynamic Interaction Between Vehicles and Infrastructure Experiment (DIVINE)*. Technical Report. OECD. Paris.

Paxson, D.S. & Glickert, J.P.(1982). Value of overweight to intercity truckers. *Transportation Research Record* No. 889. pp. 33-37.

Rascón, O., Barousse, M. and Ventura, G. (1997). *Análisis normativo y estadístico de cargas vivas en puentes en México*. (in Spanish) (Normative and statistical analysis of live loads in bridges in Mexico). Pub. Técnica 97. Instituto Mexicano del Transporte. México.

Redd, L. and Schneider, G. (1996). Systems dynamics approach to the transportation sector. *Transportation Quarterly*, Vol 50, No. 1. pp. 133-145.

Rico, A., Mendoza, A., Gutiérrez, J.L. and Mayoral E. (1997). Mexican field study to obtain basic information on truck transport. *Transportation Research Record* 1602. pp. 45-48.

Rico, O. (1998). *Evolución de la industria del autotransporte de carga en México en el periodo 1988-1993*. (in Spanish). (Evolution of road freight transport industry in Mexico from 1988 to 1993). Pub. Téc. No. 100. Instituto Mexicano del Transporte. México.

SCT (2002). Secretaría de Comunicaciones y Transportes (Mexican Secretariat of Communications and Transport). *Anuario Estadístico 2002*. (Statistical Yearbook 2002). [online]. Disponible en: <[URL:http://www.sct.gob.mx](http://www.sct.gob.mx)>. [Consultado en Ene/ 2004].

SCT. (2003). Secretaría de Comunicaciones y Transportes (Mexican Secretariat of Communications and Transport). *Reglamento sobre el peso, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal* (Code on weight, seize and capacity of commercial vehicles using federal roads and bridges) [online] Disponible en:<[URL:http://www.sct.gob.mx](http://www.sct.gob.mx)>. [Consultado en Sep/ 2003].

SCT. (2004). Secretaría de Comunicaciones y Transportes (Mexican Secretariat of Communications and Transport). (2004). *Información estadística. Indicadores operativos. Autotransporte Federal* (Statistical information. Operative indexes. Federal road transport). [online]. Disponible en: [URL:http://www.sct.gob.mx](http://www.sct.gob.mx). [Consultado en Mar/ 2004].

Shane, B.A. and Newton, W.H. (1988). *Goods vehicle overloading and road wear: results from ten roadside surveys (1980-1986)*. *Research Report 133*. Transport and Road Research Laboratory. (TRRL). Department of Transport. Crowthorne, UK.

Simetric.(2004). *Density of bulk materials. Density of liquids. Density of metals*. [online]. Disponible en: <[URL http://www.simetric.co.uk](http://www.simetric.co.uk)>. [Consultado en Ene/ 2004].

Small, K.A. and Winston, C. (1988). Optimal highway durability. *The American economic review*. Vol. 78. No. 3. pp. 560-569.

Small, K.A., Winston, C. and Evans, C.A. (1989). *Road work. A new highway pricing and investment policy*. The Brookings Institution. Washington, D.C.

SRE. (2001). *North American Free Trade Agreement: Six Years Later*. [online]. Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE). (Mexican Ministry of Foreign Affairs). Disponible en <URL:<http://www.embamexcan.com/english/economy/NAFTA.html>> [Consultado en Feb/ 2001].

Taylor, B., Bergan, A. and Berthelot, C. Heavyweight safety: Overweight commercial vehicles are a safety hazard to other motorists and have an inordinate impact on infrastructure. *Traffic technology international*. Annual Review 2000. pp. 234-237

TMIP (1996). *Quick Response Freight Manual. Final Report*. [online]. US DOT. The Travel Model Improvement Program (TMIP). Disponible en: <URL:<http://tmip.fhwa.dot.gov/clearinghouse/docs/quick/index.stm>>. [Consultado en Abr/ 2001].

Toll Collect GmbH. (2005). *Información para el usuario. El peaje para camiones – simple y práctico*. [en línea]. Disponible en: <URL:<http://personal.telefonica.terra.es/web/froet/manual%20del%20peaje.pdf>>. [Consultado en Nov/2005].

TRB, Transportation Research Board. (1996). *Paying our way. Estimating marginal social costs of freight transportation*. Transportation Research Board. Special Report 246. USA

Transport Logistic. (2002). *Motorway tolls are on the way: Truck tolls on Germany's autobahns by 2004*. [online]. Transport logistic. Actual Press Releases No. 09, November 2002. Disponible en: <URL: [http://www.transportlogistic.de/englisch/presse/cp\\_service\\_presseinformation\\_09.html](http://www.transportlogistic.de/englisch/presse/cp_service_presseinformation_09.html)>. [Consultado en Mar/ 2003].

TRB. (1996). *Paying our way: Estimating marginal social costs of freight transportation*. Transportation Research Board Special Report 246. Transportation Research Board. USA.

Urquhart, F.A. & Rhodes, A.H.(1988). *Loading characteristics of heavy goods vehicles and their effect on the structural design of highway pavements. Report 4: The incidence and effect of unequal load sharing on close-coupled axles in Cheshire*. Research Report No. 67. Transport Operations Research Group, University of Newcastle upon Tyne.

Urquhart, F.A. & Rhodes, A.H.(1990). *The assessment of pavement loading for the allocation of road track costs*. Research Report No. 73. Transport Operations Research Group, University of Newcastle upon Tyne.

US Bureau of Transport Statistics. (2001). *National Transportation Statistics 2001*. [online]. US Bureau of Transport Statistics. Disponible en: <URL: <http://www.bts.gov/publications/nts/index.html>>. [Consultado en Mar/ 2003].

US DOT. (2000). *Comprehensive truck size and weight study*. Final report. US Department of Transportation. [online] Disponible en: <URL: <http://www.fhwa.dot.gov/reports/tswstudy/TSWfinal.htm>> [Consultado en Nov 2002].

US DOT (2001). *North American Trade and Travel Trends*. U.S. Department of Transportation. Bureau of Transportation Statistics. Washington, D.C.

Walton, C.M. and Yu, C-P. (1983). Truck size and weight enforcement: A case study. *Transportation Research Record*. No. 920, pp. 26-33.

Wong, J.Y. (1978). *Theory of ground vehicles*. John Wiley & Sons. New York, pp. 153-154.

Yang, H. and Bell, M.G.H. (2001). Transport bilevel programming problems: recent methodological advances. *Transportation Research B*. Vol. 35, No. 1. pp. 1-4.





Certificación ISO 9001:2000 según documento No 03-007-MX, vigente hasta el 24 de octubre de 2006 ([www.imt.mx](http://www.imt.mx))

Laboratorios acreditados por EMA para los ensayos descritos en los documentos MM-054-010/03 y C-045-003/03, vigentes hasta el 9 de abril de 2007 ([www.imt.mx](http://www.imt.mx))

CIUDAD DE MÉXICO  
Av Patriotismo 683  
Col San Juan Mixcoac  
03730, México, D F  
tel (55) 5598-5610  
fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA  
km 12+000, Carretera  
Querétaro-Galindo  
76700, Sanfandila, Qro  
tel (442) 216-9777  
fax (442) 216-9671

[www.imt.mx](http://www.imt.mx)  
[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)