

# INCENTIVOS PARA EL DESVÍO DEL AUTOTRANSPORTE DE CARGA A LA RED CARRETERA DE PEAJE

*Eric Moreno Quintero* <sup>(1)</sup>  
México

## Resumen

En contraste con mucho de la investigación en transporte de carga centrada en los impactos para los operadores del transporte, este trabajo se enfoca en el Administrador de la Carretera que provee la infraestructura. Este punto de vista, que busca minimizar los gastos de mantenimiento del camino, en general se opone a la perspectiva de los transportistas, que buscan las mejores rutas para mover sus cargas.

Con base en la teoría de la utilidad esperada, las interacciones usuario-administrador se modelan en una red carretera con algunos tramos de peaje, con dos tipos de costo: a) el costo del viaje para el transportista, guiado por su elección de ruta, y afectado por acciones del administrador, y b) el costo para el administrador del mantenimiento carretero, que depende del tráfico, del tipo de vehículo y de la implantación de controles. Usando simulación Monte Carlo se estima una asignación estocástica de tráfico en la red carretera, determinando además descuentos óptimos en las cuotas para atraer tráfico de carga hacia los tramos carreteros con peaje. En una porción de la red carretera mexicana pavimentada se estiman descuentos óptimos que aumentan el uso de los caminos de cuota con la correspondiente reducción en los caminos libres de peaje, los que por lo general tienen pavimentos menos robustos y mayores costos de mantenimiento.

## 1. INTRODUCCIÓN

El tráfico carretero de carga resulta de la decisión de múltiples actores. Mahmassani (2001) los describe como la “Dimensión del Usuario” para el autotransporte, distinguiendo entre ellos a: 1) el planificador del sector público, 2) el sector privado en el autotransporte de carga (es decir, cargadores, transportistas y servicios logísticos) y 3) los operadores de grandes terminales de carga, generalmente ligados al sector público, pero presionados por la competencia a trabajar como empresas redituables. Estos actores, siguiendo sus propios objetivos y criterios interactúan entre sí y generan los flujos de carga.

Tocante a la calidad del camino, el impacto principal del autotransporte de carga no es la congestión, sino el deterioro del camino; se relaciona más con los pesos en los ejes de los camiones que con la congestión y la contaminación resultantes. Esto lleva a 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 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

---

<sup>1</sup> Instituto Mexicano del Transporte, A. Postal 1098, C.P. 76000, Querétaro, Qro. México, [emoreno@imt.mx](mailto:emoreno@imt.mx)

Diseño de la Red (Network Design). De modo conciso, Gentile & Papola (2001) describen el Problema del Diseño de la Red 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 esto, las políticas recientes orientadas a que el autotransporte cubra sus propios costos operacionales para reducir el uso de fondos públicos (Dalbert, 2001; European Commission, 2002), sugieren buscar maneras eficientes para manejar cualesquiera recursos dedicados a la reparación y mantenimiento carreteros.

En una red carretera con una parte de peaje, el administrador podría estimular a los transportistas a desviarse hacia los tramos de cuota con un estímulo económico. Así 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 permite recuperación de costos y la mejor calidad del camino resulta menos impactada por los pesos en los ejes de los camiones.

El papel del administrador podría especializarse aún más, habiendo 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 al ministerio de transporte) responsable del peaje, y un administrador federal dedicado a mantener la red libre.

## 2. EL MARCO DE MODELADO

En una perspectiva ingenieril la interacción entre la oferta y la demanda de transporte puede describirse con un enfoque sistémico, donde la red carretera y los actores que intervienen forman un sistema de tráfico (Daellenbach, 1997). Así, la demanda de transporte es una entrada al sistema que es transformada por éste en salidas tales como los patrones de flujo en la red carretera, el deterioro del pavimento o el costo de mantenimiento carretero. En este sistema la iniciativa es del administrador; éste regula el sistema con acciones que influyen el tráfico de camiones. El estado del sistema (para los fines del administrador) es el nivel de gasto total requerido para mantener los caminos en buenas condiciones. Distintas acciones del administrador darán distintos niveles de gasto total, de modo que la búsqueda de un esquema óptimo surge de modo natural. La Figura 1 ilustra este enfoque.

Las entradas no controladas llegan al sistema como datos fijos, p ej la matriz de origen-destino (matriz O-D), la topología de la red carretera o las características de los vehículos. Las entradas controladas pueden ser cambiadas por el administrador, como son las regulaciones generales de tráfico (máximos permitidos de velocidad y peso) para los camiones o el descuento a las cuotas. El mecanismo de control es la forma en que el administrador induce los cambios en el tráfico vehicular, y en este trabajo se toma como un descuento a las cuotas (un descuento) en el subsistema de caminos de peaje.

Las influencias que interactúan entre las partes del sistema pueden apreciarse en un diagrama de influencia (Daellenbach, 1997), ilustrado en la Figura 2. En el diagrama el símbolo de nube indica una entrada no controlada o dato, el círculo indica variables o componentes del sistema y el rectángulo indica una entrada controlada. Las flechas indican la dirección de la influencia; así, la selección de ruta está influenciada por los costos del transporte, por el error aleatorio de percepción del costo por el transportista y por la matriz O-D considerada.

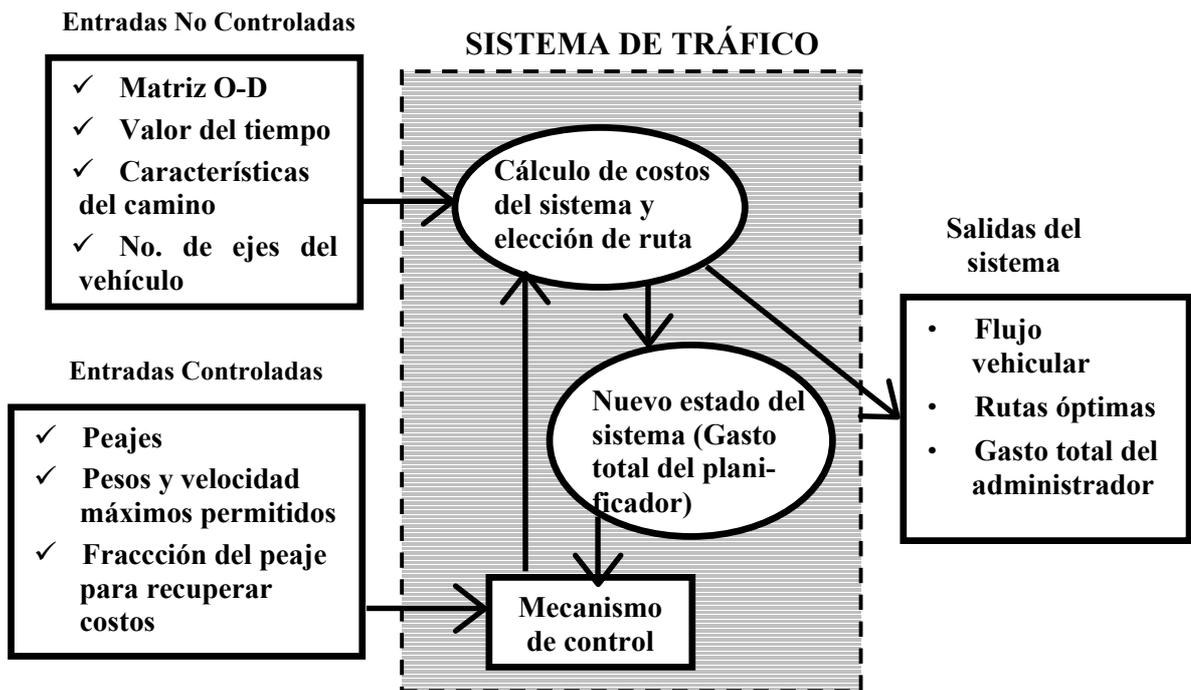


Figura 1. Un enfoque sistémico del diseño de la red

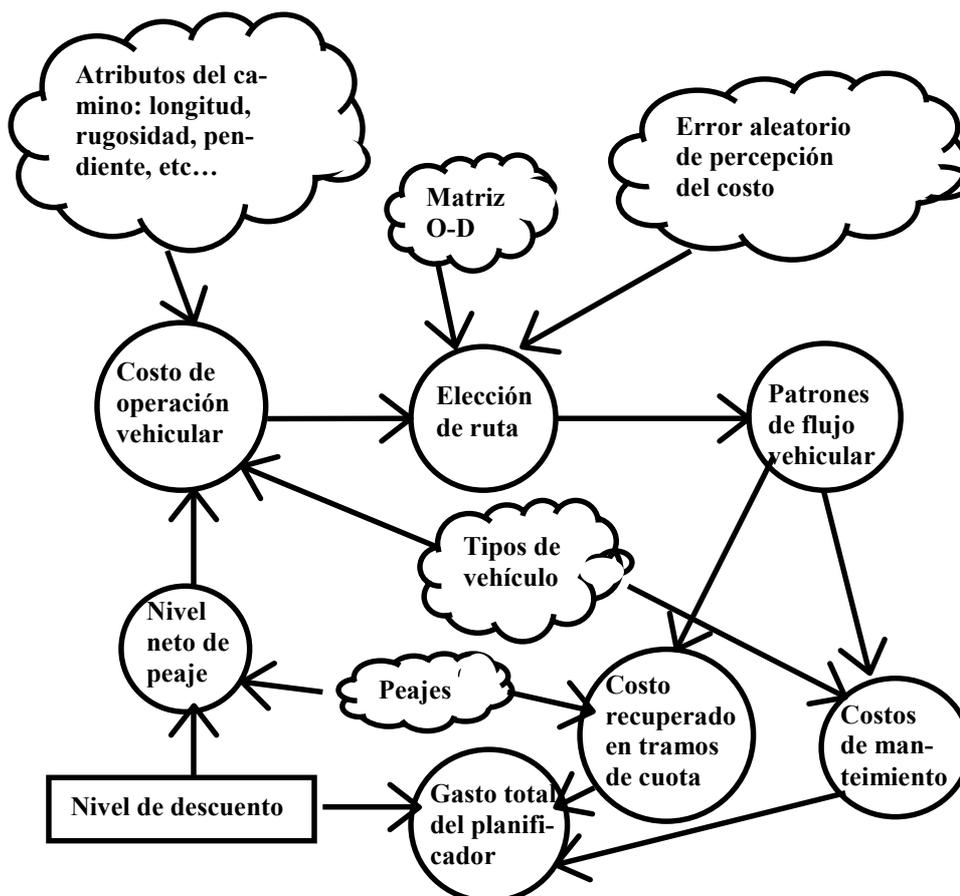


Figura 2. Diagrama de influencia para el sistema modelado

El diagrama de influencia sugiere un método de solución. Primero, el costo de operación del vehículo sobre los tramos carreteros debería depender de las características del camino

(longitud, tiempo medio de viaje, rugosidad, pendiente dominante), del tipo de vehículo y del peaje (si hay en el tramo). Luego, la elección de ruta debe considerar la matriz O-D, el costo de transporte en cada tramo y el error aleatorio de percepción del costo por los transportistas. Así, conociendo el tráfico en los tramos carreteros, se calcula el costo del deterioro del camino con el costo unitario de daño por eje equivalente estándar-kilómetro en cada tramo, la longitud del tramo y el número de ejes equivalentes estándar del vehículo (Equivalent Standard Axles, ESAL)<sup>2</sup>. Finalmente, al determinar el descuento a los peajes, se reduce el costo del transporte, y por otra parte, este descuento que absorbe el administrador, aumenta sus costos al añadirse al gasto total relacionado con el mantenimiento carretero. En los tramos de cuota, una fracción del peaje permite al administrador recuperar costos de mantenimiento. El marco de modelado presentado es un primer paso en la búsqueda de acciones efectivas para el administrador del camino a fin de reducir el gasto total en sus tareas de mantenimiento de las infraestructuras.

Este objetivo del administrador, aunque no se exprese en un contexto social, al basarse en un enfoque sistémico donde el desempeño óptimo del administrador se da sin crear nuevos impuestos o alzas de peaje, evita el exceso de carga al usuario y la pérdida de bienestar social típicas de las medidas que involucran el uso de fondos públicos (Ferrari, 2002).

### 3. EL CONTROL ÓPTIMO DE FLUJOS CARRETEROS DE CARGA

La base para modelar la interacción entre los camiones de carga y el administrador que minimiza el gasto total de mantenimiento es la estimación de los costos de quien, así como de las acciones factibles para cada uno de estos actores a fin de reducir sus propios costos.

El costo de operación de los transportistas considera dos factores: a) el costo de operación relacionado con el camino, esto es: kilometraje, pendiente dominante, peaje, etc. y b) el valor del tiempo para el movimiento de carga. Estos costos se modelan como la utilidad (negativa) que obtiene el transportista que elige una ruta para su viaje. El supuesto de percepción aleatoria del costo de operación hace más realista al modelo, ya que explica diferencias en elecciones de los transportistas bajo características idénticas de rutas.

Respecto de la forma matemática del modelo, la fuerte conectividad que es común en redes carreteras reales, hace que existan múltiples rutas que conectan el mismo par origen-destino, con tramos repetidos en distintas rutas y que por tanto correlacionan las utilidades de dichas rutas. El modelo Logit multinomial no puede manejar utilidades correlacionadas (Ortúzar & Willumsen, 1994), así que un modelo Probit multinomial parece mejor. Aunque no hay fórmulas directas para el modelo Probit multinomial, los procedimientos basados en simulación Monte Carlo pueden ser implementados de modo práctico, generando estimaciones robustas en tiempos de cómputo razonables (Sheffi, 1985).

El costo del administrador se basa en los costos de las reparaciones resultantes del tráfico de carga, y del descuento total pagado para estimular el desvío del tráfico de los tramos libres hacia los tramos con peaje. El deterioro del pavimento debido a los ejes equivalentes estándar de los camiones generan los costos de reparación. Con el costo unitario de daño por 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 del vehículo. Ya estimado el flujo total en un tramo, el costo del administrador se calcula sumando estos productos sobre

<sup>2</sup> Un ESAL equivale a un eje estándar de 18,000 libras (cerca de 8.2 toneladas), y es de uso común en México y en los Estados Unidos. (WSDOT, 2002)

todos los tipos vehiculares junto con el pago del descuento a cada vehículo. En los tramos de peaje, el administrador recupera una porción de la cuota, que se resta de su costo total. Así el administrador puede influenciar el flujo carretero de carga a fin de buscar el patrón que le de el costo total mínimo y que satisfaga la demanda implícita en la matriz O-D.

### 3.1 La Función Objetivo General del Modelo

En un caso general, la red carretera tiene tramos libres y tramos de peaje. El costo total del administrador es el costo del deterioro del camino para todos los tramos, más el efecto neto del descuento otorgado en el peaje menos la fracción de la cuota permitida para recuperar costos en los tramos de peaje. En el modelo, las restricciones representan el desvío de tráfico inducido por el modelo probabilístico para la elección de ruta por los transportistas. El modelo Probit supone las variaciones en la percepción de los costos por los transportistas con un error de distribución normal, a fin de reflejar el efecto aditivo de múltiples factores que afectan esta percepción. La principal ventaja del modelo Probit sobre el Logit es que el error de percepción puede fijarse para los tramos, con lo que el error de percepción de costo en una ruta resulta la suma de los correspondientes errores en los tramos que la integran. De este modo el modelo automáticamente trata las utilidades correlacionadas en las rutas con tramos comunes. Planteado como un problema de optimización, el gasto óptimo del mantenimiento de la red carretera es el siguiente:

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

Donde  $A_j$  = costo unitario de un ESAL-km para un camión del tipo  $j$ ;  $L_a$  = longitud del tramo  $a$ ;  $V_{aj}$  = flujo de camiones tipo  $j$  en el tramo  $a$ ;  $S_a$  = porcentaje de descuento en el tramo  $a$ ;  $R_a$  = fracción de la cuota para recuperación de costos en el tramo  $a$ ;  $F_{aj}$  = cuota en el tramo  $a$  para el camión tipo  $j$ ;  $\lambda_a$  = variable indicadora, toma el valor 1 si el tramo  $a$  es de peaje y 0 si es libre;  $P_{kj}^{rs}$  = probabilidad de que la ruta  $k$  del origen  $r$  al destino  $s$  sea elegida por el camión tipo  $j$ ;  $Q_j^{rs}$  = flujo de camiones tipo  $j$  del origen  $r$  al destino  $s$ ;  $\delta_{ka}^{rs}$  = toma el valor 1 si el tramo  $a$  está en la ruta  $k$  del origen  $r$  al destino  $s$  y 0 en caso contrario;  $U_{kj}^{rs}$  = utilidad que obtiene el camión tipo  $j$  en la ruta  $k$  de  $r$  a  $s$ ;  $K^{rs}$  = el conjunto de rutas que conectan el origen  $r$  al destino  $s$ ;  $C_{aj}$  = costo unitario por km de operación para el camión tipo  $j$  en el tramo  $a$ ;  $M_j$  = valor del tiempo para el camión tipo  $j$ ;  $T_a$  = tiempo de recorrido del tramo  $a$ ; y  $\varepsilon_j$  = error de percepción del costo para el vehículo tipo  $j$ , con distribución normal de media cero y desviación estándar  $\sigma_j$ ,  $N(0, \sigma_j^2)$ .

El modelo, sin embargo, paga el precio de su mayor realismo sobre el modelo Logit, en que carece de fórmulas de tratamiento directo, pues su formulación lleva a una distribución normal multivariada para considerar la selección de rutas. No obstante, esta dificultad puede resolverse estimando los flujos vehiculares en las rutas con simulación Monte Carlo (Sheffi, 1985); esta técnica es la base para resolver el problema planteado en este trabajo.

### 3.2 Los Elementos de Modelado

El sistema de tráfico descrito se ajusta bien al paradigma de elección discreta, el marco teórico donde hay individuos que hacen elecciones de entre un conjunto finito de alternativas (Ortúzar and Willumsen, 1994). El error aleatorio de percepción del costo lleva usar la utilidad esperada como medida de desempeño para el transportista. Éste considera que el costo de operación en cada tramo de la red carretera depende de la longitud del tramo, del tiempo de recorrido y del peaje (si es que hay). Dado un costo unitario de operación por kilómetro (CUO) y un valor del tiempo (VDT) para el transportista, el costo de recorrer un tramo está dado por:

$$\text{Costo del transportista} = \text{CUO} * (\text{Longitud del tramo}) + \text{VDT} * (\text{Tiempo de recorrido}) + \text{Cuota} - \text{Descuento}$$

Los factores operativos que se supone afectan el costo del transportista son: la velocidad de viaje, la pendiente media del tramo y su rugosidad (medida con el Índice Internacional de Rugosidad, IIR). La relación usada es:

$$\text{CUO} = a + b_0 (\text{Velocidad})^{b_1} (\text{IIR})^{b_2} (\text{Pendiente} + 10)^{b_3}$$

con constantes específicas  $a$ ,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  y  $b_3$ , para cada tipo de camión (Rico, 1995).

El IIR mide el estado de la superficie de rodamiento, y surgió de un estudio internacional hecho por el Banco Mundial (OECD, 1990)<sup>3</sup>. Para caminos pavimentados el IIR toma valores de 0 a 12, con 0 representando un camino uniforme perfecto y 12 un camino prácticamente intransitable. Como una referencia amplia, la práctica norteamericana considera un camino Bueno para un IIR menor a 2.4, Regular si el IIR varía de 2.4 a 4.7 y Malo para valores mayores a 4.7 (SCT/DGCC, 2001).

El costo relacionado al tiempo de recorrido se calcula con el Valor del Tiempo (VDT). El valor del tiempo en el transporte de carga, a diferencia del transporte de pasajeros se relaciona más con los costos del arrastre de carga que dependen del tiempo de viaje, tales como el salario del operador, el combustible usado o los intereses sobre el capital del inventario implícito en la carga; este enfoque se conoce como el método de factores para estimar el VDT (Gwilliam, 1997).

Dadas las estimaciones de costo en cada tramo del camino, el error aleatorio de percepción los altera ligeramente, representando así a los transportistas que toman decisiones percibiendo la utilidad esperada (el valor negativo del costo) sobre cada posible ruta a usar. La utilidad se reduce por el peaje y aumenta por el descuento. Dados el origen y el destino, la ruta se elige tratando de maximizar la utilidad esperada (costo esperado mínimo).

El administrador de la carretera tiene dos tipos de costo: las reparaciones resultantes de los ESALs impuestos por los vehículos a los caminos, y el descuento pagado a los camiones que usan los tramos de cuota; este último costo disminuye por la fracción del peaje permitida recuperar costos en estos tramos. Dado un costo unitario de daño por ESAL-km (CUD), un número promedio de ESALs recorriendo el tramo y el flujo vehicular correspondiente, el costo para el administrador en el tramo es:

<sup>3</sup> El IIR se calcula como la razón del valor absoluto de los movimientos verticales acumulados del sistema de suspensión de una rueda viajando a 80 km/h a la distancia total viajada. Las unidades del IRI son mm/m o m/km.

Costo del administrador = (Flujo en el tramo )\*(CUD\*ESALs\*Longitud de tramo + Descuento – Fracción de cuota para recuperar costos).

El modelo descrito se basa en simulación Monte Carlo. Las principales rutinas que realiza el programa FORTRAN elaborado para este propósito se muestran en la Figura 3.

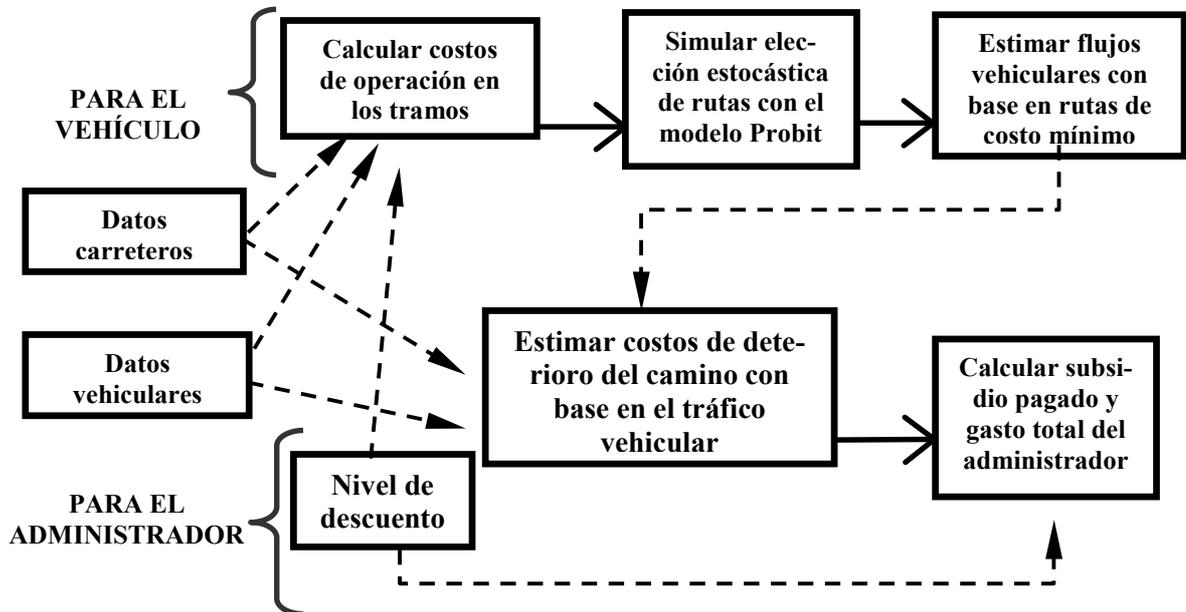


Figura 3. Modelo para la elección estocástica de ruta

#### 4. UN ESTUDIO DE CASO EN MÉXICO

El estudio de caso se basa en la red pavimentada mexicana, donde hay un subsistema de cuota (cerca de 7,000 km en 2003) desde hace años (Moreno and Watling, 2002). Las ineficiencias resultantes del incremento en el tráfico carretero de carga al término de los años 90 en México plantearon el problema de encontrar más medidas de control a fin de reducir los impactos del transporte de carga. En estos años, el tráfico carretero de carga en México se alteró notablemente luego de la desregulación del autotransporte en 1989, el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) en 1994 y la privatización de los ferrocarriles mexicanos en 1997. Estos cambios indujeron nuevos flujos de carga, resaltando la relevancia de caracterizar estos flujos carreteros así como la estimación de sus impactos en áreas como: selección de rutas, daño al pavimento, prácticas de sobrecarga y regulaciones como pesos máximos autorizados, niveles de peaje y esquemas de vigilancia. En el caso mexicano la necesidad de acciones era clara, y un primer paso fue el estudio estadístico de campo del autotransporte nacional promovido anualmente por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes desde 1991, a fin de coleccionar datos sobre el tráfico carretero de carga en la red pavimentada (Rico et al, 1998). Las intervenciones sin embargo, deberían evaluarse antes de implantarse, y es en esta tarea que el modelado del tráfico carretero de carga resulta de gran utilidad.

La red de muestra usada en el modelo está al noreste del país, en la frontera México-Estados Unidos, como se ve en la Figura 4. El diagrama de la red contiene 18 nodos y 30 tramos, incluyendo cinco con peaje.

Los tipos dominantes de camión en las carreteras mexicanas son cinco: dos tipos rígidos (de 2 y de 3 ejes) y tres tipos articulados (de 5, 6 y 9 ejes). Los tipos rígidos aproximadamente representan el 60% de la flota (Rico, 1997).

Las cuotas en los cinco tramos de peaje de la red usada se muestran en la Tabla 1. Sobre esta base, los flujos en la red muestra se modelaron bajo dos escenarios:

- 1) El administrador mantiene toda la red, teniendo una fracción de las cuotas para recuperar gastos en los tramos de peaje, y
- 2) El administrador mantiene sólo los tramos libres de peaje, dejando al subsistema de peaje hacer su propio mantenimiento, pero pagando el descuento al uso de los tramos de cuota.

Este último caso es el de una agencia autónoma que administra el subsistema de peaje, dejando al administrador federal la responsabilidad de mantener el resto de la red.



Figura 4. Red de muestra modelada

Ambos escenarios fueron modelados con distintos supuestos respecto a:

- El valor del tiempo para el transportista (4 niveles)
- El error aleatorio en la percepción del costo por el transportista (4 niveles) y
- El valor de costo unitario de deterioro del camino (3 niveles).

Tramo	Del nodo	Al nodo	Distancia (km)	Tiempo (hh:mm)	Rígido 2 Ejes	Rígido 3 Ejes	Artic. 5 Ejes	Artic. 6 Ejes	Artic. 9 Ejes
Pto.México - 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 1. Peajes en la red de muestra (Pesos mexicanos). (CAPUFE, 2002)

Los escenarios se modelaron con la red muestra completa, con recuperación de costos en los tramos de peaje y sólo para la red libre de peaje; los subíndices a) y b) en las variables se usan para denotar esto.

#### 4.1 El Escenario de Valor del Tiempo (VDT)

La Figura 5 muestra el gasto total para valores del tiempo desde VDT1 (promedio de 90.0 pesos/hr) hasta VDT4 (221.6 Pesos/hr); el primer valor se basó en salarios mínimos generales en México y el último en un reporte de Kawamura (2000) sobre una

investigación de valor del tiempo en California. Un coeficiente de variación del 10% se usó para la percepción aleatoria del costo.

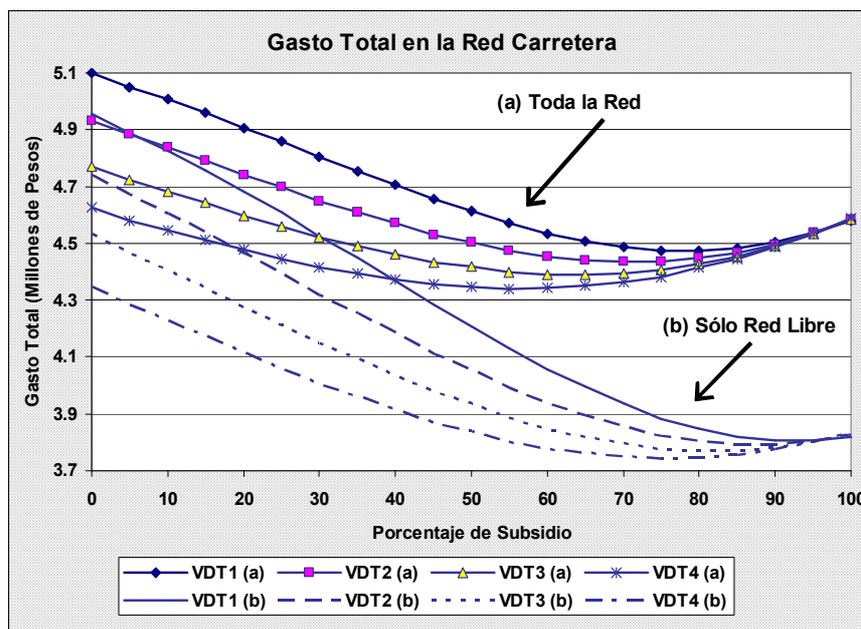


Figura 5. Gasto total del administrador vs. descuento para distintos Valores del Tiempo

Los descuentos óptimos para la red completa para los valores del tiempo VDT1(a) to VDT4(a) son aproximadamente 75%, 70%, 60% y 55% respectivamente. Para el mantenimiento sólo en la red libre, los descuentos óptimos para VDT1(b) a VDT4(b) son aproximadamente: 90%, 90%, 85% y 75% respectivamente. Los correspondientes niveles de gasto total se presentan en la Tabla 2. La Figura 5 indica que mayores valores del tiempo para los transportistas inducen mayor uso de los tramos de cuota, lo que reduce el esfuerzo del administrador para desviar tráfico de la red libre hacia la de peaje; esta propensión se explica en los valores decrecientes tanto de los puntos óptimos (mínimos) en las curvas como en los correspondientes niveles de gasto total.

La tendencia decreciente en la variación del costo (ahorros) de la Tabla 2 sugiere que hay un valor umbral para el valor del tiempo en el cual el administrador tiene ahorro nulo, esto es, un valor del tiempo para el que no se requiere de estímulo para usar los tramos de peaje. Una extrapolación lineal simple da este umbral como 328.2 Pesos (cerca de US\$ 33) en la red completa, y 422.30 Pesos (cerca de US\$ 42) para el caso de mantener sólo la red libre. Por el contrario, con un descuento del 100%, no importa cuál sea el valor del tiempo, los camiones usarán siempre los mejores tiempos de los tramos de cuota, dando el mismo patrón de flujo, y por tanto un mismo gasto total para el administrador; esto concuerda con la convergencia de las curvas de la Figura 5 al mismo punto para un descuento del 100%.

Respecto de los niveles de gasto total, la Figura 5 muestra menores valores para el caso de mantenimiento sólo en la red libre, a pesar del pago de descuento para estimular el desvío de tráfico hacia los tramos de cuota.

En este caso, la red a mantener es más pequeña: mientras que la red completa cubre 4,000 km, la red libre cubre 3,371 km, lo que es una reducción del 16%.

	TODA LA RED				SOLO RED LIBRE			
	VDT1(a)	VDT2(a)	VDT3(a)	VDT4(a)	VDT1(b)	VDT2(b)	VDT3(b)	VDT4(b)
Gasto sin descuento	5,099,448	4,931,722	4,771,115	4,624,446	4,954,979	4,740,448	4,535,272	4,348,167
Gasto óptimo	4,474,660	4,433,884	4,388,402	4,339,876	3,805,073	3,791,923	3,771,899	3,741,937
Variación	-12.3%	-10.1%	-8.0%	-6.2%	-23.2%	-20.0%	-16.8%	-13.9%

Tabla 2. Niveles de gasto total para diferentes valores del tiempo.

### 4.2 El Escenario del Error Aleatorio de Percepción de Costo

Para el error aleatorio de percepción del costo por los transportistas, el caso base con valor del tiempo VDT1 (promedio 90 Pesos/hr) se probó con cuatro valores del coeficiente de variación respecto del costo medio: 10%, 15%, 20% y 25%. Los descuentos óptimos para la red completa fueron aproximadamente: 75%, 65%, 55% y 35%, y los correspondientes a sólo la red libre fueron aproximadamente: 90%, 90%, 80% y 60% respectivamente. La Figura 6 y la Tabla 3 muestran estos valores. Las curvas en la Figura 6 se aplanan a medida que la incertidumbre aumenta, lo que confirma que mayor incertidumbre en la percepción del costo inutiliza la información que pueda proveer el administrador sobre la conveniencia de los descuentos. La tendencia decreciente en los ahorros mostrados en la Tabla 3 sugiere que hay un valor umbral de incertidumbre para el cual el ahorro es nulo, es decir, que en ese caso hay tal incertidumbre que ninguna promoción de descuentos resulta útil. Alternativamente, la incertidumbre pudiera reducirse con medidas como señalización mejorada en los caminos o servicios de información incluidos en las tareas de mantenimiento del administrador.

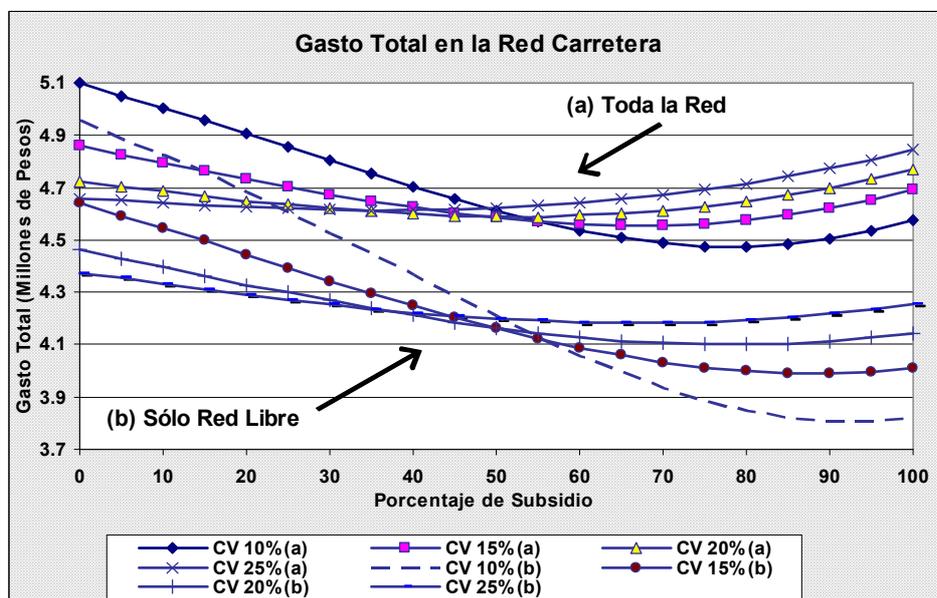


Figura 6. Gasto total del administrador vs. descuento para diferentes percepciones del costo

	TODA LA RED				SÓLO LA RED LIBRE			
	Coeficientes de Variación				Coeficientes de Variación			
	10% (a)	15% (a)	20% (a)	25% (a)	10% (b)	15% (b)	20% (b)	25% (b)
<b>Gasto sin descuento</b>	5,099,448	4,860,209	4,723,143	4,659,192	4,954,979	4,643,109	4,461,841	4,371,384
<b>Gasto óptimo</b>	4,474,660	4,557,064	4,588,192	4,613,147	3,805,073	3,988,306	4,100,080	4,183,700
<b>Variación</b>	-12.3%	-6.2%	-2.9%	-1.0%	-23.2%	-14.1%	-8.1%	-4.3%

Tabla 3. Gasto total del administrador vs. descuento para diferentes dispersiones (coef. de var.) del error de percepción del costo

### 4.3 El Escenario para el Costo de Deterioro del Camino

Tocante a los valores usados para el costo unitario de deterioro (CUD), tres grupos de valores fueron probados: CUD1 con 0.46 Pesos/km-ESAL en la red libre y 0.32 Pesos/km-ESAL en la red de peaje; CUD2 con 0.53 y 0.25 Pesos/km-ESAL en la red libre y en la de peaje respectivamente, y CUD3 con valores de 0.60 & 0.18 como en los casos anteriores. La Tabla 4 resume los gastos totales estimados en las simulaciones.

Los descuentos óptimos correspondientes a la Tabla 4 son aproximadamente: 55%, 75% y 95% respectivamente, para los casos CUD1 al CUD3 en toda la red, mientras que los correspondientes a la red libre son aproximadamente: 85%, 90% y 100%; en particular, este último valor no se encuentra en el mínimo de la curva de costo, sino que es el último valor de descuento modelado.

	TODA LA RED			SÓLO LA RED LIBRE		
	CUD1(a)	CUD2(a)	CUD3(a)	CUD1(b)	CUD2(b)	CUD3(b)
<b>Gasto sin descuento</b>	4,517,890	5,099,448	5,681,006	4,300,548	4,954,979	5,609,411
<b>Gasto óptimo</b>	4,319,773	4,474,660	4,459,130	3,475,794	3,805,073	4,103,988
<b>Variación</b>	-4.4%	-12.3%	-21.5%	-19.2%	-23.2%	-26.8%

Tabla 4. Niveles de gasto total para distintos costos unitarios de deterioro.

La tendencia creciente del porcentaje de descuento óptimo indica que a medida que aumenta el costo unitario de deterioro (ya sea por baja calidad en los materiales del camino, los distintos tipos de vehículos o la presencia de sobrecarga) mayor esfuerzo debe hacer el administrador para atraer tráfico a los tramos de peaje a fin de lograr mejores ahorros en su gasto total. En el caso de la red libre, el descuento del 100% para el tercer costo unitario de deterioro CUD3 sugiere que para altos costos de deterioro en la red libre, cualquier preferencia de los transportistas por el uso de esta red debe desalentarse, aún cuando esto signifique pagar el 100% de la cuota de manera que no haya camiones de carga en esa ruta.

### 4.4 Los Cambios en el Flujo

Un efecto directo de esta interacción usuario-administrador se tiene en los patrones del flujo vehicular en los tramos de cuota antes y después de la implantación de los descuentos. La Tabla 5 muestra los cambios de flujo para el escenario de toda la red con el

caso base (valor del tiempo VDT1), y la Tabla 6 da los valores para el escenario de sólo la red libre. El incremento en el flujo de los tramos de peaje bajo el esquema de descuento óptimo resulta notable, en promedio un aumento del 365% para los flujos totales. De los 9,125 vehículos simulados en la red muestra, antes del descuento, los tramos de cuota tenían  $812 + 791 = 1603$  vehículos (17.6% del total) mientras que con el descuento óptimo los tramos de cuota tuvieron  $2964 + 2891 = 5855$  vehículos (64.2% del total). En ambas tablas es evidente too el flujo nulo en el último tramo de cuota (del nodo 16 al 17) debido al escaso flujo originado y atraído por el nodo 18.

Tramo	De	A	Sin descuento		Descuento óptimo		Variación	
			Saliente	Entrante	Saliente	Entrante	Saliente	Entrante
Pto.Mexico - OjoCaliente	5	9	24	26	99	107	412.5%	411.5%
Monterrey - Reynosa Cuota	10	12	190	195	879	902	462.6%	462.6%
Monterrey - N.Laredo Cuota	10	15	204	196	1340	1275	656.9%	650.5%
Matamoros - Reynosa Cuota	11	12	394	374	646	607	164.0%	162.3%
Sabinas - Allende Cuota	16	17	0	0	0	0	---	---
Sum:			812	791	2964	2891	365.0%	365.5%

Tabla 5. Patrones de flujo en los tramos de cuota en el escenario de la red completa.

Tramo	De	A	Sin descuento		Descuento óptimo		Variación	
			Saliente	Entrante	Saliente	Entrante	Saliente	Entrante
Pto.Mexico - OjoCaliente	5	9	24	26	117	128	487.5%	492.3%
Monterrey - Reynosa Cuota	10	12	190	195	1036	1067	545.3%	547.2%
Monterrey - N.Laredo Cuota	10	15	204	196	1646	1578	806.9%	805.1%
Matamoros - Reynosa Cuota	11	12	394	374	672	630	170.6%	168.4%
Sabinas - Allende Cuota	16	17	0	0	0	0	---	---
Sum:			812	791	3471	3403	427.5%	430.2%

Tabla 6. Patrones de flujo en los tramos de cuota en el escenario de mantenimiento sólo a la red libre.

Para el escenario de mantenimiento sólo en la red libre, la Tabla 6 presenta los valores correspondientes. En este caso, antes del descuento el tráfico en los tramos de cuota fue de  $812 + 791 = 1603$  vehículos, y luego del esquema de descuento óptimo este tráfico aumentó a  $3471 + 3403 = 6874$  vehículos (75.3% del total).

## 5. CONCLUSIÓN

Mucho de la investigación en el transporte de carga ha considerado implícitamente actores individuales: transportistas y embarcadores en el negocio de acarreo de carga, productores enviando mercancías, o consumidores demandando productos y que consecuentemente inducen servicios de transporte. El administrador del camino que provee las reparaciones y el mantenimiento, sin embargo, es otro actor interesado en el tráfico de carga. Sin influencia en la fijación de tarifas ni en la creación de impuestos, ni teniendo a la mano estimaciones de la voluntad de pago por el deterioro del camino por parte de los transportistas, el administrador de la carretera por lo general tiene un presupuesto limitado que lo obliga a buscar su utilización óptima. De este modo, sin considerar aumentos de impuestos o de tarifas que afecten el bienestar social de los usuarios, pero tratando de optimizar el uso de sus recursos, el administrador del camino adopta un esquema de descuento para estimular el desvío de tráfico hacia el sistema de carreteras de peaje, que en

general pueden tener mejor calidad de pavimento y por tanto menores costos unitarios de deterioro.

El modelo que se ha presentado prueba este esquema de descuentos para reducir el gasto total del administrador en sus tareas de mantenimiento. Con el ensayo de la pequeña parte de la red mexicana pavimentada que se ha modelado, los resultados muestran que el esquema de descuento puede reducir los niveles de gasto total del administrador en comparación con la decisión de no hacer nada. Los factores que parecen reducir el gasto total del administrador son: elevados valores del tiempo para los transportistas, bajos valores de incertidumbre acerca de costos de operación y bajos valores unitarios de deterioro del camino.

Respecto del valor del tiempo para el transporte de carga, más investigación se requiere para estimar este parámetro, en particular para México. De los escenarios mostrados para distintos costos unitarios de deterioro del camino, parece ser que el gasto total del administrador es altamente sensible a variaciones de este parámetro. Esto se liga al problema del sobrepeso que incrementa aceleradamente este tipo de costos, y sugiere otra línea de investigación.

Finalmente, el interés por fomentar el uso de las infraestructuras carreteras de peaje es común a los administradores carreteros en muchas partes del mundo, como en el caso español citado por Matas y Raymond ( ) : “*La fijación de peaje en una carretera puede resultar en una mala asignación del tráfico entre la autopista de peaje y el camino libre en paralelo. Existen varios ejemplos en España de subutilización de secciones de peaje en autopistas, mientras que el camino alternativo libre se encuentra severamente congestionado, con el consecuente incremento en costos de mantenimiento y ambientales. En tales casos, reducir el peaje podría mejorar la asignación del tráfico y, por tanto, reducir los costos totales del uso de la infraestructura*”.

En el modelo presentado, los beneficios de la reasignación del tráfico se logran sin que el concesionario de las autopistas de peaje tenga que reducir sus niveles de cuota.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

CAPUFE (2002). Caminos y Puentes Federales. [en línea]. Disponible en: <URL: <http://www.capufe.gob.mx>>. [Accesado: Feb/2002]

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.

European Commission. (2002). *White Paper. European transport policy for 2010: time to decide*. [en línea]. Disponible en: <URL:[http://europa.eu.int/comm/energy\\_transport/en/lb\\_en.html](http://europa.eu.int/comm/energy_transport/en/lb_en.html)>. [Accesado June/2002].

Ferrari, P. (2002). *Road network toll pricing and social welfare*. Transpn. Research B Vol. 36 (5) pp. 471-483.

Gentile, G. and Papola, N. (2001). *Network Design through Sensitivity Analysis and Singular Value Decomposition*. Proceedings of the Triennial Symposium on Transportation Analysis (TRISTAN-IV). June 13-19, 2001. Azores, Portugal.

- Gwilliam, K.M. (1997). *The Value of Time in Economic Evaluation of Transport Projects*. In Infrastructure Notes, Transport NO.OT-5 World Bank. [en línea]. Disponible en :<URL: <http://www.worldbank.org/transport/publicat/td-ot5.htm>>. [Accesado Jul 2002]
- Kawamura, K. (2000). *Perceived Value of Time for Truck Operators*. Transpn. Res. Rec. No. 1725. pp. 31-36.
- Mahmassani, H.S. (2001). *Freight and Commercial Vehicle Applications*. In Travel Behaviour Research: the Leading Edge. Edited by David Hensher. Pergamon. Elsevier Science Ltd. Oxford, UK. Pp. 289-297.
- Matas, A. y Raymond, J.L. (2003). *Demand Elasticity on Tolled Motorways*. Journal of Transportation and Statistics Vol: 6 No: 3.,pp. 91-108.
- Mittelman, H.D. & Spellucci, P. (2002) *Decision Tree for Optimization Software*, World [en línea]. Disponible en: <URL: <http://plato.asu.edu/guide.html> > [Accesado Jun 2002]
- Moreno, E. and Watling, D. (2002). *A stochastic route choice model in optimal control of road freight flows: a Mexican case study*. In: Proceedings of the 9th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, held at Bari, Italy from June 10th -13th, 2002.
- OECD. (1990). *Road Monitoring for Maintenance Management. Vol. 1. Manual for Developing Countries*. Organisation for Economic Co-operation and Development. Paris.
- Ortúzar, J.D. and Willumsen, L.G. (1994). *Modelling Transport*. Second Edition, John Wiley & Sons. UK.
- Press, W.H.; Teukolsky, S.A.; Vetterling, W.T. & Flannery, B.P. (1992). *Numerical Recipes in Fortran 77. The Art of Scientific Computing*. Second Edition. Vol. 1. Cambridge University Press. US
- Rico, A., Mendoza, A and Rivera, C. (1995). *Criterios para establecer la cuota óptima en una autopista de cuota. (Logro del máximo ingreso del recaudador y del mínimo costo nacional del transporte)*. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica. No. 60. Mexico.
- Rico, A.; Mendoza, A.; Gutiérrez, J.L. and Mayoral E. (1997). *Mexican Field Study to Obtain Basic Information on Truck Transport*. Transpn. Research Rec. 1602, pp. 45-48
- Rico, A., Mendoza A. and Mayoral E. (1998). *Main Freight Land Transport Corridors in Mexico*. Transpn. Research Rec. 1613, pp. 79-87
- SCT/DGCC (2001). Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Dirección General de Conservación de Carreteras (DGAF). [en línea]. Disponible en:<URL: [http://www.sct.gob.mx/direccion\\_gral/dgcc/ct40.html](http://www.sct.gob.mx/direccion_gral/dgcc/ct40.html)>. [Accesado Ago 2001]
- Sheffi, Y. (1985). *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*. Prentice-Hall, USA.
- WSDOT, Washington State Department of Transportation. (2002). WSDOT Materials Laboratory. [en línea]. Disponible en: <URL: [http://www.wsdot.wa.gov/fossc/mats/pavement/pave\\_req.htm](http://www.wsdot.wa.gov/fossc/mats/pavement/pave_req.htm)>. [Accesado Ago/2002]