



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

EL SOBREPESO EN EL AUTOTRANSPORTE DE CARGA: ELEMENTOS PARA SU ESTUDIO Y CONTROL

Eric Moreno Quintero

**Publicación Técnica No 250
Sanfandila, Qro, 2004**

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**El sobrepeso en el transporte
carretero de carga: elementos para
su estudio y control**

**Publicación Técnica No 250
Sanfandila, Qro, 2004**

Este trabajo fue realizado en la Coordinación de Integración del Transporte, del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. Eric Moreno Quintero. La investigación en la que se basa forma 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) fue desarrollada en el Institute for Transport Studies de la Universidad de Leeds, Reino Unido, durante el tiempo en que el autor fue becario del Instituto Mexicano del Transporte, habiendo sido terminada y aceptada por la Universidad de Leeds en septiembre de 2004.

Contenido

Resumen	iii
Abstract	v
Resumen ejecutivo	vii
1. Introducción	1
2. El contexto del autotransporte de carga al término del siglo 20	5
2.1 La situación en México	5
2.2 La planeación en el autotransporte de carga norteamericano	12
2.3 La problemática en Europa	17
3. Elementos de modelación del sobrepeso en el transporte carretero de carga	23
3.1 Los impactos del autotransporte de carga	23
3.2 Un marco de referencia sistémico para el transporte carretero de carga	33
3.3 Objetivos del transportista y objetivos del planificador: conflicto y coexistencia	37
4. Relaciones entre el sobrepeso, el daño al camino y la vigilancia	43
4.1 La interacción entre transportista y planificador	44
4.2 Los factores físicos: la carga, el vehículo y el camino	48
4.3 Los factores económicos: el costo y el desempeño del autotransporte de carga	54
4.4 La dificultad de hacer cumplir los reglamentos	57
4.5 Una aproximación hacia el control de sobrepeso	64
5. Un modelo de programación binivel para el control de camiones con sobrepeso	71
5.1 El escenario del autotransporte de carga en México	71
5.2 La ocurrencia de sobrepeso	73
5.3 El enfoque de programación binivel	77

6. Conclusiones	93
6.1 Conclusiones	93
6.2 Líneas de trabajo futuro	97
Anexo A. Reporte típico del paquete HDM-VOC v 4.0	101
Anexo B. Reporte del HDM-VOC v 4.0. Camión tipo T3-S2	105
Anexo C. Tabla de sensibilidad de costo en el HDM-VOC v 4.0. Camión tipo T3-S2	107
Bibliografía	109

Resumen

El sobrepeso en el autotransporte de carga es una práctica ampliamente extendida alrededor del mundo. Esta práctica ocasiona niveles considerables de daño al camino que el responsable de la carretera tiene que reparar, muy frecuentemente, con presupuestos limitados.

De los efectos negativos, comúnmente generados por el tránsito vehicular: la congestión; las emisiones contaminantes; los accidentes; el ruido y el daño a la infraestructura, todos excepto el último son comunes tanto a camiones de carga como a automóviles y autobuses. El daño al pavimento, sin embargo, tiene tres peculiaridades: 1) es atribuible exclusivamente a los vehículos de carga; 2) crece muy bruscamente al aumentar los pesos que llevan, y 3) no se percibe de inmediato, como los otros impactos, lo que dificulta tanto su control como la concientización de los transportistas acerca de la magnitud del impacto.

La compleja interacción que se da entre los derechos de los transportistas a usar las carreteras, la obligación del responsable del camino de mantener la calidad de la infraestructura, el deseo del transportista de reducir sus costos operativos mediante las prácticas de carga que más le convengan, las facultades del planificador/autoridad de carreteras para imponer regulaciones, la relevancia del transporte de carga en la economía nacional y los presupuestos usualmente limitados del responsable del camino, plantea un interesante problema con múltiples agentes que interactúan entre sí y que tiene el objetivo principal de trabajar por el uso racional de la infraestructura, sin menoscabo de los beneficios que el transporte de carga aporta a la economía.

Mediante un enfoque de sistemas para el transporte de carga, en este trabajo se adopta el punto de vista del planificador responsable del camino, quien interactúa con los transportistas que mueven sus cargas en la red carretera. Los objetivos distintos y conflictivos entre los transportistas que tratan de minimizar sus costos operativos llevando sobrecarga, y el planificador que busca reducir sus costos de reparación y mantenimiento del camino, se modelan en un esquema de *programación binivel*, en el cual el planificador es el "líder" que impone medidas para controlar las respuestas de los "seguidores", es decir, los transportistas de carga que usan la red carretera.

El análisis de las cadenas causa-efecto en este modelado sistémico, junto con el modelo presentado y los ejemplos numéricos desarrollados indican algunas posibilidades de mejorar los objetivos de costo del responsable del camino y de lograr un uso más racional de la infraestructura.

Abstract

Overloading in road freight transport is a common problem happening around the world. This freight practice inflicts substantial damage to the road, which in turn has to be repaired by the road planner, usually with a constrained budget.

From the usual negative effects generated by vehicle flows: congestion, emissions, accidents, noise and infrastructure damage, all but the latter are common to cars, buses and heavy good vehicles (HGV). Road damage however, has three particularities: 1) it is attributable exclusively to HGVs, 2) it increases very sharply with the vehicle weight and 3) it is not perceived immediately as it happens with the other impacts, thus making difficult both its control and the carrier's awareness of its relevance.

The complex combination of the carriers' rights to road usage, the planner's duty to maintain the road quality, the carriers' aim of reducing costs by using the most cost effective loading of vehicles, the planner's entitlement to impose road regulations, the importance of road freight transport in the economy and the usually limited maintenance budget available to road planners, poses an interesting problem of multiple interacting agents having as a key objective the rational use of the road infrastructure without diminishing the freight transportation benefits.

Using a systemic approach to freight transport, this research adopts the planner's view when committed to the repair and maintenance of the road and interacting with the carriers using the infrastructure. The different and conflicting objectives between carriers minimising operation costs and the planner minimising road repair costs are modelled in a *bi-level programming* scheme, where the planner is the "leader" imposing measures to control the response of the "followers", i.e. the carriers using the road.

The analysis of the cause-effect chains, along with the model presented and the numerical examples worked out indicate that some improvements on the planner's cost objectives can be achieved, inducing more rational uses of the road infrastructure.

Resumen ejecutivo

Al finalizar el siglo XX, el autotransporte se ha manifestado como el modo dominante en el movimiento terrestre de carga en gran parte del mundo industrializado. Este predominio del modo carretero en el reparto modal autotransporte-ferrocarril, observado en México, en los Estados Unidos y en la Unión Europea se ha reafirmado luego de los cambios macroeconómicos resultantes de los acuerdos de libre comercio que cubren extensas regiones, como son el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), firmado por México, Canadá y los Estados Unidos en 1994; y el gran proyecto de la Unión Europea, que en 2004 incluyó a 25 países de ese continente.

Los efectos negativos que el tránsito de vehículos automotores trajo consigo: congestión, contaminación atmosférica, accidentes, ruido y daño a la infraestructura se han convertido en objeto de preocupación de los planificadores del transporte. De estos impactos, todos excepto el último, son comunes al tránsito de automóviles, autobuses y camiones de carga. El daño al camino, sin embargo, se distingue de los demás impactos por tres características: 1) es generado exclusivamente por los vehículos de carga; 2) su magnitud crece muy rápidamente al aumentar los pesos en los ejes de los camiones; y 3) no se percibe tan obviamente como los otros impactos, que usualmente saltan a la vista.

Los pesos brutos vehiculares de los camiones, mucho mayores en comparación con los pesos de otros vehículos automotores, y la aparente dependencia del daño al pavimento de los pesos en los ejes del vehículo como una función potencia de grado cuatro (la llamada “Ley de la 4ª potencia”) explican la asociación del daño a la infraestructura con el flujo de camiones de carga.

La práctica de sobrecargar los camiones, fuera de toda consideración de conducta antisocial o delictiva, tiene cierta “racionalidad” desde el punto de vista económico, ya que aumenta la productividad del autotransporte al reducir el número de viajes requerido para mover cargas y bajar el costo promedio por tonelada- kilómetro, puesto que los costos de la operación se prorratan entre un mayor número de toneladas movidas.

El sustancial incremento en el daño al camino que los movimientos sobrecargados generan perturban de modo notable los planes de mantenimiento y reparación que el responsable del camino tiene para afrontar la tarea de mantener la calidad de la infraestructura en niveles adecuados para el servicio de transporte carretero.

Esta circunstancia, que se agrava por las usuales restricciones presupuestales del encargado del mantenimiento carretero así como por la necesidad de atender la gran extensión de la red de carreteras libres de peaje, plantea un serio problema de planeación del transporte: la búsqueda de esquemas efectivos de control del sobrepeso, que frenen el acelerado desgaste de la infraestructura que este impacto genera, y que propicien así un uso más racional de la carretera y una mayor durabilidad de los recursos empleados en su mantenimiento.

En este trabajo se analiza el problema del flujo de camiones con sobrecarga, y los elementos que intervienen en el diseño de esquemas de control.

Luego de una introducción general a la problemática propia del autotransporte de carga en el capítulo 1, en el capítulo 2 se hace un breve examen del contexto del autotransporte de carga al término del siglo XX. Revisando las situaciones del transporte carretero de carga en México, en los Estados Unidos y en la Unión Europea, se puede observar una similitud en el crecimiento del tráfico de carga, con predominio del modo carretero en el movimiento de toneladas y de productos de gran valor. Igualmente, se puede notar una semejanza en la ocurrencia de sobrecarga en los camiones, aunque las medidas de vigilancia y coerción al cumplimiento de los reglamentos de pesos varían entre los distintos países.

Entre las medidas orientadas al control de vehículos sobrecargados, destaca por una parte el uso intensivo que se ha dado en los últimos años al pesaje dinámico (weigh-in-motion, WIM, en la literatura inglesa) que ha permitido aumentar drásticamente la detección de infractores, y por otra parte la propuesta abierta de aplicar cargos a los camiones de carga con base tanto en las toneladas movidas como en la distancia recorrida sobre la red carretera; por ejemplo, el caso de las tarifas para camiones de carga en Suiza y en Alemania.

De los esfuerzos norteamericanos en la planeación del transporte de carga, la cual ha cobrado mayor importancia en los últimos años, resaltan las dos estrategias básicas que surgieron de las discusiones del *Freight Analysis Framework* (FAF, 2002):

- a) La necesidad de contar con un contexto institucional expresamente dedicado al apoyo de trabajos de identificación de los temas críticos en el transporte de carga, así como al seguimiento de los procesos de solución propuestos
- b) La necesidad de disponer de un mecanismo de financiamiento amplio y perdurable para respaldar la implantación de los proyectos que se hayan seleccionado, a fin de mejorar el desempeño del transporte de carga

Estas estrategias sugieren una atención permanente y dedicada en los procesos de planeación del transporte, a las particularidades que se presentan en el transporte de carga.

La metodología de análisis del problema del sobrepeso que se utiliza en este trabajo es la modelación. La construcción de modelos, pese a las abstracciones y simplificaciones de la realidad que necesariamente se deben hacer, tiene la ventaja de enmarcar la discusión en un proceso lógico y encadenado que permite identificar los aspectos esenciales que determinan la problemática, generando así guía y direcciones de las posibles iniciativas de solución que pudieran implantarse.

En el capítulo 3 se aborda la cuestión de los elementos que resultan pertinentes de tomar en cuenta para emprender la modelación de la problemática del sobrepeso. Primeramente se consideran los impactos de la sobrecarga en el desempeño de los propios vehículos y en el camino por el que circulan. La

reducción de la velocidad y el aumento en el consumo de combustible del vehículo sobrecargado, así como la forma de estimar el daño al pavimento con base en ejes equivalentes se discuten en esta parte.

La evaluación del daño al pavimento basada en la “Ley de la 4^a potencia”, derivada de los experimentos de la AASHO entre 1958 y 1960, y que especifica que el daño estructural que provoca un eje dado se aproxima a la cuarta potencia de la razón de la carga en el eje al peso del eje estándar de referencia (18,000 libras) se muestra como el paradigma conservador de estimación de daño a la infraestructura, y que en las unidades de ejes equivalentes estándar, ESAL (Equivalent Standard Axle Load), dan al planificador del camino un punto de referencia para la comparación de niveles de daño estructural en proyectos carreteros.

Luego de esto, se presenta un marco de referencia con un enfoque de sistemas para el transporte de carga, en el cual la actividad es vista como un sistema en el cual hay entradas, como son la matriz de origen-destino, el valor del tiempo, los atributos del camino, los tipos de vehículo, etc, que son transformadas por la actividad en salidas del sistema, tales como flujos vehiculares, rutas óptimas, factores de carga óptimos, y en impactos tales como el daño al pavimento, el costo de las reparaciones, o los accidentes. En este sistema, el planificador tiene la capacidad de ejercer control a través de medidas como los reglamentos de velocidad y pesos de los vehículos, la vigilancia y las multas por infracciones a los reglamentos.

Un aspecto central en el análisis de los elementos de modelado que se presenta, es la interdependencia entre parámetros y variables de decisión de los transportistas que mueven sus cargas, y del planificador de carreteras que se encarga del mantenimiento y reparación del camino. Mientras que el transportista decide sobre el factor de carga con el que opera su camión, esta cantidad resulta ser un parámetro en el cálculo de costos de reparaciones del responsable del camino. Análogamente, mientras que el planificador de carreteras decide sobre el nivel de multa por exceso de peso, tal cantidad resulta ser un parámetro en la estimación de costos esperados de operación del transportista.

El doble papel que una misma entidad numérica juega en estas interacciones, al ser variable de decisión de uno de los actores pero al mismo tiempo parámetro de la función de costos del otro actor, crea esta interdependencia de los procesos de decisión de transportistas y planificador. De esta manera, aparece como conveniente el uso de *programación binivel* para modelar las interacciones que surgen en el problema del sobrepeso. Esta técnica, es en sí un programa matemático en el cual hay dos funciones objetivo a optimizar, pero que se resuelven en un orden jerárquico. La primera función (llamada “del líder” o “de nivel superior”) representa el objetivo del planificador de minimizar los montos de reparaciones del camino; la segunda (llamada “del seguidor” o “de nivel inferior”) representa el objetivo del transportista de minimizar los costos de operación del vehículo frente al esquema de control del planificador de carreteras. Esta segunda función objetivo se incluye en el programa matemático como una de las restricciones que debe cumplir la función objetivo del nivel superior.

Al incluir como restricción del problema de optimización del planificador las condiciones de optimalidad del transportista, el esquema de programación binivel da al primero una alta prioridad en el proceso de optimización, sin restar posibilidades de optimización al “seguidor” en las interacciones, a saber, el transportista.

La programación binivel ha mostrado ser una poderosa herramienta de modelación en procesos donde un planificador de transporte trata de controlar las respuestas de los usuarios del sistema, permitiendo a éstos a su vez buscar soluciones óptimas; en la literatura incluyen como ejemplos: el manejo óptimo de semáforos en redes urbanas, la optimización del uso de la capacidad existente en carreteras, y el diseño de peajes óptimos en autopistas (ver Yang y bell, 2001, p.1).

El capítulo 4 analiza las relaciones entre el sobrepeso en los camiones de carga, el daño al pavimento y los esquemas de vigilancia y coerción al cumplimiento del reglamento de pesos.

Mediante diagramas de influencia para analizar las cadenas de causa-efecto, así como la formación de ciclos que refuerzan o atenúan los efectos, en este capítulo se encuentran tres condiciones básicas para la ocurrencia del sobrepeso en los vehículos de carga:

1. La sobrecarga requiere ciertas condiciones físicas para poder darse. Así, el tipo de carga movida, las características del camino (en particular la pendiente) y la potencia disponible en el motor aparecen como los elementos que determinan la posibilidad física de sobrecargar.
2. La sobrecarga en el autotransporte tiene que ser un estímulo económico para el transportista. De ahí que analizando los beneficios respectivos se aclara cuándo resulta conveniente a éste el sobrepeso en los vehículos.
3. Los esquemas de vigilancia y de coerción al cumplimiento del reglamento de pesos, inevitablemente son vulnerables. Esta condición, que se presenta en cualquier lugar del mundo, lleva al análisis de los elementos disponibles para el control de sobrepeso con mayores posibilidades de eliminar esta práctica, o al menos de mantenerla dentro de límites razonables para el planificador del camino.

Del análisis de los factores físicos que determinan el sobrepeso resulta evidente que ciertos movimientos, como por ejemplo el transporte de cargas ligeras (alfalfa, carbón, etc), el movimiento de cargas más densas (cemento, acero, madera, etc.) en caminos con pendientes y curvaturas de consideración, o el transporte de insumos para la producción “justo a tiempo” que no toleran las bajas velocidades implícitas en la sobrecarga, están físicamente limitados para llevar sobrepeso.

Del análisis de los factores económicos que motivan la sobrecarga en los camiones, la disminución del número de viajes requerido para el transporte así como la tendencia decreciente del costo promedio por tonelada-kilómetro resultaron ser las razones principales de motivación a la sobrecarga, ya que la reducción en el costo total de las operaciones del transportista es un estímulo que

beneficia tanto a transportistas privados como a los dedicados al transporte público federal.

Tocante a la vulnerabilidad de los esquemas de vigilancia, la revisión de varios ejemplos norteamericanos evidencian tanto la dificultad de implantar un sistema de coerción que resulte infalible, como la necesidad de mantener una vigilancia constante, con sanciones significativas y esquemas de aleatoriedad en la inspección que reduzcan la certidumbre de los transportistas para identificar patrones de inspección que pudieran ser detectados con facilidad y consecuentemente evadidos.

A fin de enmarcar el modelado del problema de sobrepeso en la técnica de programación binivel propuesta, el capítulo 4 termina con la construcción de las funciones de costo para el transportista y para el planificador, el planteamiento del programa binivel que se propone resolver y una propuesta de método de solución, dado que a la fecha este tipo de problemas de optimización no tienen un algoritmo general de solución, como los que pudieran encontrarse en otros paradigmas como la programación lineal, la programación cuadrática o la programación dinámica.

En el capítulo 5 se aborda la construcción detallada del modelo de programación binivel para control de sobrepeso en el autotransporte de carga con datos originados en el Estudio de Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional.

Luego de analizar la información estadística sobre los tipos vehiculares dominantes en el tráfico carretero de carga en México, sus configuraciones de ejes y los costos promedio de operación, que se calcularon con base en series de corridas del paquete HDM-VOC v 4.0 del Banco Mundial, en este capítulo se estiman y ajustan funciones de daño al pavimento para los tipos vehiculares y funciones de costo de operación vehicular, las que se sustituyen en el modelo de programación binivel propuesto en el capítulo 4.

Utilizando el proceso de solución descrito en el capítulo 4, se presentan ejemplos numéricos de control de sobrepeso para dos de los tipos vehiculares dominantes en el tráfico carretero de carga: el camión rígido de tres ejes, y el camión articulado de seis ejes. Las gráficas reflejan la correlación entre la intensificación de los esquemas de vigilancia y la reducción en la incidencia de sobrecarga en los vehículos analizados.

Finalmente, el capítulo 6 reúne una serie de conclusiones sobre las observaciones más relevantes de esta investigación, y describe algunas líneas de acción para investigación futura, entre las que se encuentran las siguientes:

- a) Los datos analizados han mostrado que los camiones con más ejes distribuyen mejor las cargas y tienen menores coeficientes de daño (ESALs); los esquemas tarifarios en las autopistas de cuota sin embargo, incrementan el nivel de cobro conforme más ejes tienen los camiones. Un estudio de estos esquemas tarifarios a fin de adecuar el nivel de cobro según el nivel de daño causado por los distintos tipos vehiculares contribuiría a mejorar la equidad de las tarifas, promoviendo así el uso de

unidades menos agresivas y la eliminación de subsidios cruzados entre los usuarios de las autopistas de cuota.

- b) De los datos del Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional se evidencia que los camiones que no sobrecargan tiene en promedio pesos brutos menores a los máximos permitidos por el reglamento de pesos vigente. Aunque teóricamente pudiera pensarse en la posibilidad de transferir la carga en exceso que llevan con la capacidad subutilizada de aquellos dentro de reglamento, la viabilidad de esta medida se vería seriamente limitada por la gran variedad de cargas que se mueven, con distintas características de manejo, de embalaje y de origen – destino. Sin embargo, considerando este desequilibrio de cargas como efecto total de los ejes equivalentes que la carretera soporta, pudiera pensarse que los camiones que no sobrecargan dejan una holgura de ejes equivalentes no usados, que para propósitos prácticos “absorben” parte de los excesos de los que van sobrecargados. Esta circunstancia apunta a una línea de investigación futura de esta “compensación de ejes equivalentes” relacionada con el diseño del pavimento.
- c) La aportación de datos del transporte carretero de carga que el Estudio Estadístico de Campo ha hecho al tema ha resultado fundamental para investigaciones futuras. Este estudio de campo ha probado ser una tarea indispensable que debería mantenerse rigurosamente cada año. Este es un ejemplo típico de la clase de proyectos apoyados por un mecanismo de financiamiento orientado al estudio e identificación de los temas críticos del autotransporte, tal como se describió en las propuestas norteamericanas de estrategias para integrar la problemática del transporte de carga dentro de la actividad general de la planeación del transporte, que se describen en el capítulo 4.

1 Introducción

El autotransporte, desde que empezó a ser el modo dominante en los movimientos terrestres de carga en la segunda mitad del siglo XX, trajo consigo los mismos efectos no deseados que ya se habían manifestado por el uso intensivo del automóvil en el ámbito urbano: congestión, contaminación ambiental, accidentes y ruido. Un impacto adicional que no está ligado al tránsito de automóviles o de autobuses es el daño a las infraestructuras, el cual es atribuible exclusivamente a los camiones de carga (como se verá más adelante); además, genera altos costos de reparaciones y mantenimiento al camino, que el responsable de las infraestructuras tiene que enfrentar y moderar.

Por otra parte, al final de los años 90, varios países volcaron su atención hacia ciertos contratiempos en sus sistemas de autotransporte de carga, que planteaban problemas urgentes de resolver.

Hoy en día, los sistemas carreteros en la mayoría de los países desarrollados han dejado atrás su etapa de crecimiento; y la idea de asignar más recursos a la conservación de infraestructuras que a la extensión de estos sistemas, aparece con un gran sentido de actualidad. Este punto de vista se había manifestado ya en las primeras discusiones sobre la productividad del sector del autotransporte de carga en los Estados Unidos (Cambridge Systematics, Inc & Reebie Associates, Inc, 2000), donde se hablaba de un cambio en la proposición de soluciones, con el fin de pasar del enfoque de construir más infraestructura al enfoque de optimizar el uso de la infraestructura existente.

En los Estados Unidos, el antecedente legal de esto surgió en 1991 con la ley de eficiencia en el transporte terrestre intermodal (Intermodal Surface Transportation Efficiency Act), que exigía a las organizaciones y agencias de planificación del transporte tomar en cuenta los movimientos urbanos de carga para la elaboración de sus planes de largo plazo. En un estilo similar, el Marco de Análisis para Carga (Freight Analysis Framework, FAF) desarrollado por la administración federal de carreteras de los Estados Unidos (Federal Highway Administration, FHWA, 2002) propuso una metodología para estimar los flujos carreteros de carga en las carreteras norteamericanas, luego de examinar las relaciones geográficas entre los sistemas a nivel local y el sistema a nivel federal, con el fin de identificar áreas susceptibles de mejoramiento en las que pudieran facilitarse los movimientos de carga, y aprovechar capacidades subutilizadas en el sistema.

En segundo lugar, al término del siglo XX en buena parte del mundo industrializado se dieron cambios macroeconómicos que han afectado al transporte carretero de carga, como es el caso de las desregulaciones en el autotransporte, las privatizaciones de los ferrocarriles y los acuerdos comerciales regionales o internacionales con extensas coberturas geográficas, donde existe diversidad de infraestructuras y usos del transporte de carga. Estas medidas generaron cambios notables tanto en los flujos terrestres de carga como en

aquellas actividades encaminadas a estar al día con todos los ajustes requeridos en cuanto a mantenimiento carretero, estructuras impositivas, cargos a usuarios del camino, máximos valores permitidos de peso y velocidad, etc.

Dos conocidos ejemplos de estos acuerdos comerciales, son el proyecto de la Unión Europea (UE) que fue firmado en 1993 por los países entonces miembros de la Comunidad Europea y el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), firmado por México, Canadá y los Estados Unidos en 1994.

El gran proyecto de la Comunidad Europea planteó enormes desafíos para conformar una red carretera integrada y estandarizada que permitiera movimientos de carga con gran fluidez a lo largo del continente europeo. Estudios auspiciados por la UE, tales como WORKFRET (*Working Cultures in the Face of Intermodal Freight Transport, Culturas de Trabajo ante el Transporte de Carga Intermodal*) con el objetivo de desarrollar un sistema de transporte de carga eficiente para toda Europa mediante la inclusión tanto de los intereses como de las necesidades de los involucrados en las operaciones de transporte (CORDIS, 1997), o el estudio SOFTICE (*Survey on Freight Transport Including a Cost Comparison for Europe, Encuesta de Transporte de Carga con una Comparación de Costos para Europa*), que se orientó a identificar parámetros clave que determinan las estructuras de costos del transporte de carga en los estados miembros de la UE, así como los factores que afectan la demanda del transporte (European Commission, 1999), ejemplifican este renovado interés europeo por los temas de transporte de carga.

En el caso del TCLAN, uno de los primeros efectos que se observaron fue el incremento en los flujos de carga en las carreteras de los países firmantes, en especial en los puntos fronterizos de cruce. En México en particular, el antecedente de la desregulación del autotransporte en 1988 combinado con el inicio de la privatización de los ferrocarriles mexicanos en 1997, estimuló todavía más la tendencia creciente de los flujos carreteros de carga (SRE, 2001).

Por último, las políticas recientes dirigidas a que el transporte cubra sus costos de operación se basan en la consideración de que si los usuarios del camino deben reintegrar los costos totales que generan sus movimientos, se tendrá un uso más racional y eficiente de los servicios de transporte. El consecuente efecto de tales políticas en la reducción del uso de fondos públicos ha motivado a la búsqueda de formas eficaces para administrar los recursos destinados al mantenimiento de una infraestructura adecuada (TRB, 1996, p.1; European Commission, 1998, p.1; Dalbert, 2001).

En virtud de lo anterior, la atención de los planificadores del transportes se ha dirigido hacia los temas de la caracterización de los flujos carreteros de carga, y a la estimación de los posibles impactos en áreas como: selección del modo de transporte y de la ruta; daño a la infraestructura y costos de reparación del camino; prácticas de sobrepeso en el autotransporte de carga, valores máximos de pesos y velocidades, y los sistemas de vigilancia e inspección del autotransporte. Las intervenciones que sean requeridas, sin embargo, conviene que se evalúen antes

de ser implantadas, y es en esta tarea que resalta la utilidad de los modelos de tráfico carretero de carga.

Las circunstancias descritas, aunadas a la escasez de metodologías disponibles enfocadas expresamente al transporte de carga al final de los años 90, enfatizan la importancia de una modelación adecuada que tome en cuenta los rasgos inherentes a los movimientos de carga, a fin de encontrar soluciones apropiadas a los problemas que plantea esta actividad.

De los problemas más obvios a resolver en el ámbito del transporte de carga, el de los impactos que afectan tanto al propio sistema de carga como a otros sistemas y sectores, es uno de los más urgentes. Los impactos del transporte carretero más comúnmente citados son: la congestión, la contaminación ambiental, los accidentes, el ruido y el daño al camino.

Todos estos impactos, a excepción del último son comunes en automóviles, autobuses y camiones de carga. El daño al camino como ya se ha comentado, es atribuible sólo a los camiones de carga, y representa enormes costos para el responsable del camino; el hecho de que no se perciba inmediatamente como pasa con los otros impactos citados, es parte de lo que dificulta su control.

En el contexto de los ambientes físico y normativo en los que se lleva a cabo el transporte de carga; esto es, la red de caminos, la flota vehicular y las intervenciones de la autoridad que regula el autotransporte, los papeles inseparables del transportista que utiliza la infraestructura carretera; y el responsable del camino, dedicado a su mantenimiento y al control del tráfico, sugiere la modelación de sus interacciones como un primer paso para entender el comportamiento de cualquier variable que sea pertinente en la descripción del sistema de transporte de carga. En particular, la práctica de sobrecargar los camiones, independientemente de su obvia ilegalidad y de su conexión con el aumento del riesgo de accidentes en los movimientos de carga, genera elevados costos de conservación para el responsable del camino, quien no siempre dispone del presupuesto necesario para mantener las carreteras en niveles aceptables de calidad. Este punto de vista es la guía que orienta la investigación presentada en este trabajo.

2 El contexto del autotransporte de carga al término del siglo XX

El sector del transporte carretero de carga ha evolucionado desde un inicio modesto en la primera mitad del siglo XX, pasando por el desarrollo de las modernas redes de autopistas en Europa y los Estados Unidos, hasta llegar a ser el modo dominante en los movimientos terrestres de carga con la consecuente caída en el uso del ferrocarril en muchos países al término de la década de los 1990. De manera simultánea con su crecimiento, el transporte carretero de carga ha generado una diversidad de consecuencias no deseadas que reclaman soluciones efectivas que al mismo tiempo no limiten los beneficios que ya proporciona el autotransporte.

En este capítulo se hace un breve examen de las tendencias más comunes observadas en el autotransporte de carga. De esta revisión, una mejor comprensión de los factores que generan los impactos del autotransporte se consigue al examinar las tendencias de los aspectos básicos que describen al transporte terrestre de carga, tales como el reparto modal autotransporte-ferrocarril; el número de compañías transportistas; las regulaciones en vigor; los tipos de vehículos utilizados; y las prácticas logísticas más comunes en la actividad de arrastre de cargas.

Para fundamentar este examen, se analiza la evidencia empírica de tres estudios de caso: México, los Estados Unidos (EEUU y la Unión Europea (UE) en la década de los 90, como ejemplos de países que están reestructurando sus sectores de autotransporte en respuesta a las necesidades y a los cambios recientes en esta actividad.

2.1 La situación en México

Durante los años 90, tres importantes cambios económicos en México impactaron notablemente al autotransporte de carga:

1. La desregulación del autotransporte de carga iniciada en 1989
2. El Tratado de Libre Comercio para América del Norte (TLCAN) en 1994
3. La privatización de los ferrocarriles mexicanos que arrancó en 1997

El resultante aumento en los flujos carreteros de carga debido a estos cambios realzaron la importancia de controlar los impactos del autotransporte de carga.

Estos tres cambios macroeconómicos tan distintos, se describen con más detalle enseguida.

La desregulación del autotransporte de carga

En julio de 1989 se inició la desregulación del autotransporte de carga en México. Esta política cambió el escenario del transporte carretero de carga, de ser un marco rígidamente regulado con fuerte intervención gubernamental a un marco más abierto basado en la libre entrada y en precios fijados a través del mecanismo de equilibrio en el mercado (Dutz, et al, 2000). Sus principales objetivos fueron: a) promover una organización de mercado adecuada a los rasgos económicos del autotransporte de carga; esto es, que reconociera las distintas proporciones de costos fijos a costos variables, así como los requerimientos logísticos de los movimientos de menos de carro entero en comparación con los movimientos de carro completo; b) alcanzar niveles de precios reales y competitivos en el sector autotransporte, a través del mecanismo de mercado; c) impulsar la productividad de las compañías transportistas por medio de la competencia, y d) promover la integración de las prácticas logísticas en la actividad económica del autotransporte de carga (Rico, O, 1998).

Los efectos inmediatos de la desregulación se observaron tanto en el número de compañías transportistas como en los equipos tractivos y de arrastre utilizados. La fig 2.1 muestra el número de compañías en el servicio público federal en el periodo 1986-1999, y la 2.2 los correspondientes cambios en el parque vehicular usado por estas compañías.

Estas gráficas sugieren un cambio en las tendencias de uso de equipo y en el número de compañías transportistas en los años posteriores a la desregulación. La pequeña variación en el número de empresas entre 1986 y 1988 en la fig 2.1 contrasta con la tendencia de aumento lineal observada de 1989 a 1993, donde un nuevo salto es observado en 1994, que fue el año de inicio del TLCAN.

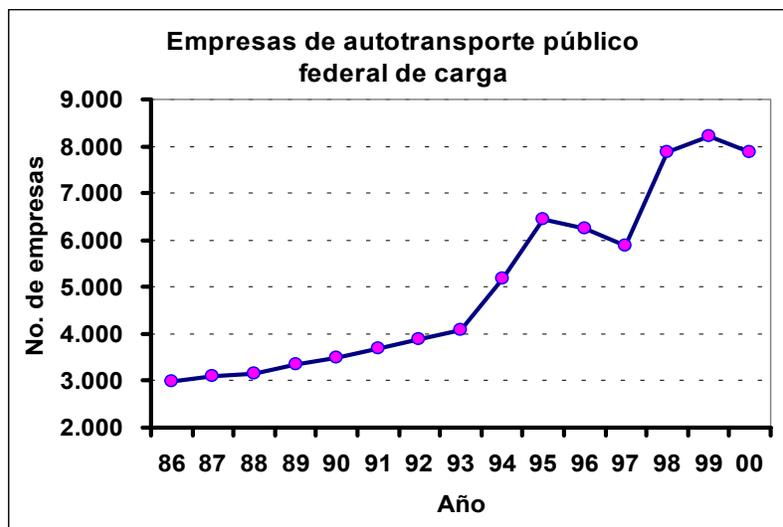


Figura 2.1. Empresas de autotransporte público federal de carga. 1986-2000 (IMT, 2001)

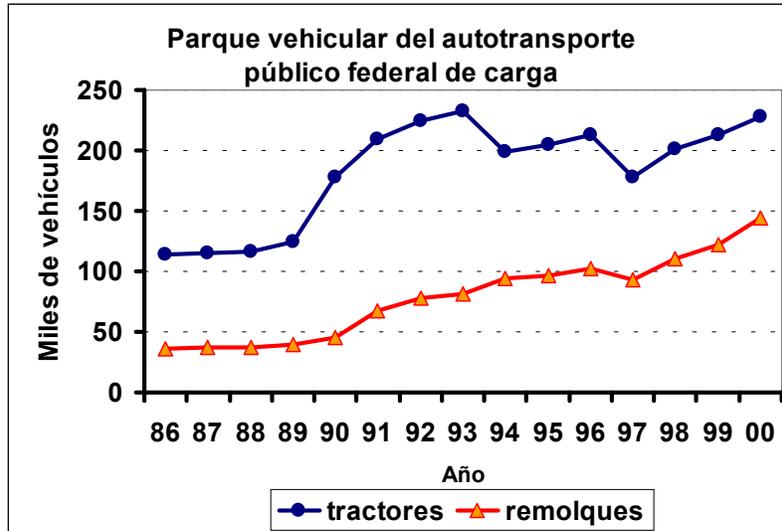


Figura 2.2. Evolución del parque vehicular en el autotransporte público federal de carga, 1986-2000 (IMT 2001)

Respecto de la evolución del parque vehicular, en la fig 2.2 se observa una pequeña variación en el número de tractores y remolques entre 1986 y 1988, en comparación con los incrementos después de 1990. En especial, el tamaño de la flota vehicular aumentó aceleradamente hasta llegar a un máximo en 1993, acercándose de nuevo al inicio del TLCAN en 1994. Ambas gráficas revelan un claro incremento en el número de empresas transportistas, así como en la flota vehicular en la segunda mitad de la década de 1990, lo que indica un muy probable aumento tanto en las toneladas movidas como en las toneladas-kilómetro producidas en esos años.

El Tratado de Libre Comercio para América del Norte (TLCAN)

Este tratado comercial, firmado por México, Canadá y los Estados Unidos inició en enero de 1994 con el propósito básico de lograr la gradual eliminación de tarifas, aranceles, y en general obstáculos al libre comercio de casi cualquier producto fabricado y vendido en América del Norte. En una evaluación sexenal del TLCAN, la Secretaría de Relaciones Exteriores ha reportado incrementos sustanciales del comercio en el periodo 1993 – 1999.

Aun cuando estos resultados se deben en parte a la bonanza económica de los Estados Unidos en esta época, el TLCAN ha mostrado sus propios méritos. De 1993 a 1999 el intercambio comercial mexicano en dólares corrientes con Canadá aumentó en 95%; mientras que las ventas canadienses a México crecieron en 154%. En 1999, México exportó a los Estados Unidos alrededor de 121 mil millones de dólares corrientes, lo que es un aumento del 182% comparado con los casi US\$ 43 mil millones exportados en 1993. Las importaciones de los Estados Unidos en 1999 fueron casi 105 mil millones de dólares corrientes, lo que significó 133% de aumento con respecto a los US\$ 45 mil millones importados en 1993. La fig 2.3 muestra las exportaciones e importaciones de vehículos motorizados en

México en el periodo indicado; este sector económico ha sido uno de los más dinámicos dentro del TLCAN (SRE, 2001).

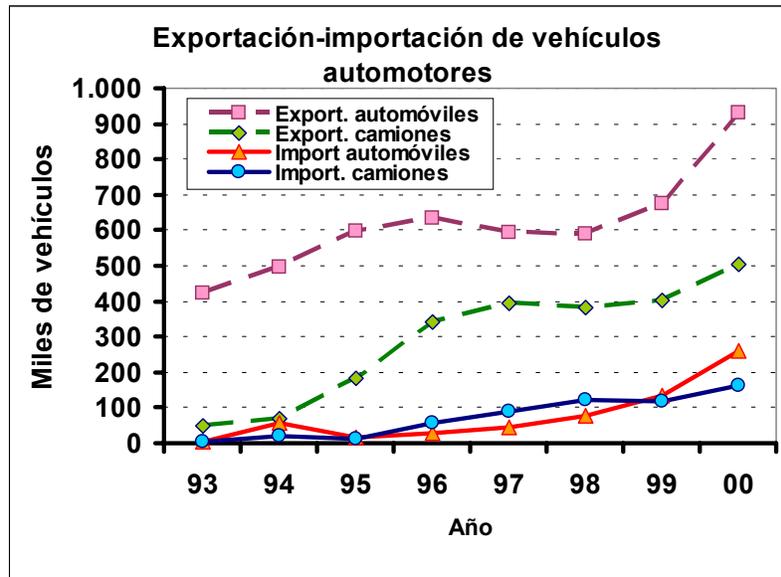


Figura 2.3. Exportaciones-importaciones de vehículos automotores. 1993-2000 (IMT 2001)

La privatización de los ferrocarriles mexicanos

El siguiente cambio que afectó al sector del autotransporte de carga fue la privatización ferroviaria, que arrancó en 1997. Las dos primeras líneas privatizadas fueron: Transportación Ferroviaria Mexicana (TFM) en sociedad con la línea norteamericana Kansas City Southern Industries, y Ferrocarril Mexicano (FERROMEX), asociado con la línea norteamericana Union Pacific. Estas dos empresas, con cerca del 38% de la red ferroviaria en 1997, expandieron su participación a cerca del 48% en 2003, haciendo conexiones con todos los puntos de cruce en la frontera norte con los Estados Unidos, compitiendo así con el sistema carretero de carga.

Sin embargo, nuevas empresas en el ramo de equipo ferroviario, partes y refacciones y servicios para la industria ferroviaria incrementaron más el tráfico terrestre de carga, generando más transacciones en el autotransporte de carga. La fig 2.4 muestra las toneladas-kilómetro del transporte terrestre de carga de 1991 a 2001. La tendencia creciente en el transporte carretero resalta en comparación con el lento aumento del movimiento ferroviario, el cual luego del salto inicial de 1997 a 1998 mostró una tendencia estable en los años sucesivos.

La participación del autotransporte de carga en el reparto modal de los movimientos terrestres de carga, tanto en toneladas movidas como en t-km producidas en el periodo 1986-1999 se muestra en la fig 2.5, donde el descenso en 1995 y 1996 parece recuperarse en 1997. En estos años, la red pavimentada

nacional fue expandida también, pasando de 76,948 km en 1986 a 110,910 km en 2001.

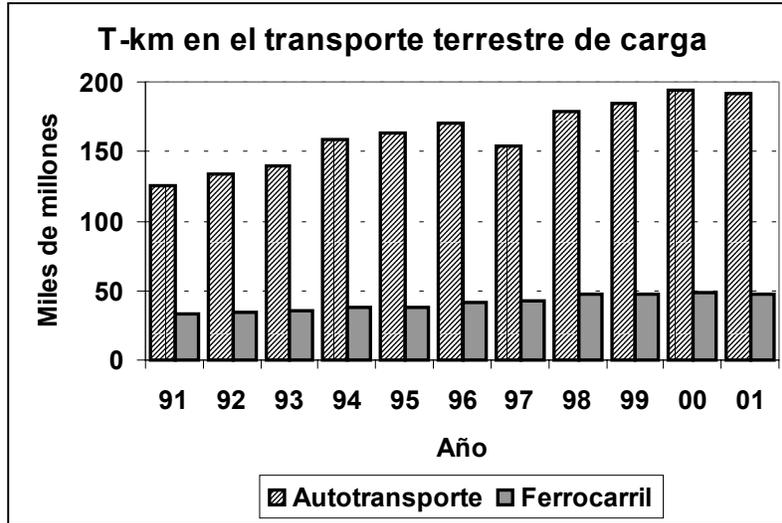


Figura 2.4. t-km en el transporte terrestre de carga (fuente: SCT, www.sct.gob.mx)

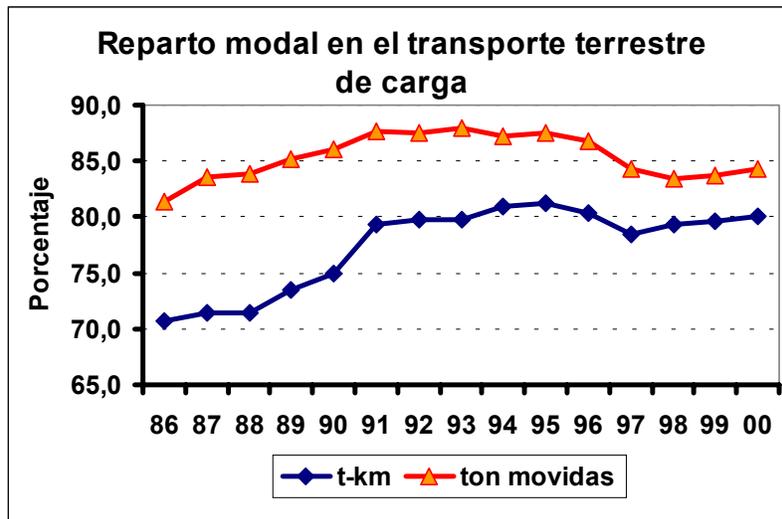


Figura 2.5. Participación del autotransporte en el movimiento terrestre de carga. (basada en IMT, 2001)

La densidad del equipo de arrastre en las carreteras (en vehículos por kilómetro de camino) mostrado en la fig 2.6 es una gruesa apreciación del uso de la infraestructura carretera por los camiones cargueros en esos años. La curva de la densidad de los remolques muestra saltos de crecimiento cercanos al año de la desregulación (1989) y del año de la privatización ferroviaria (1997), sugiriendo un impacto directo de estos cambios en la industria del autotransporte.

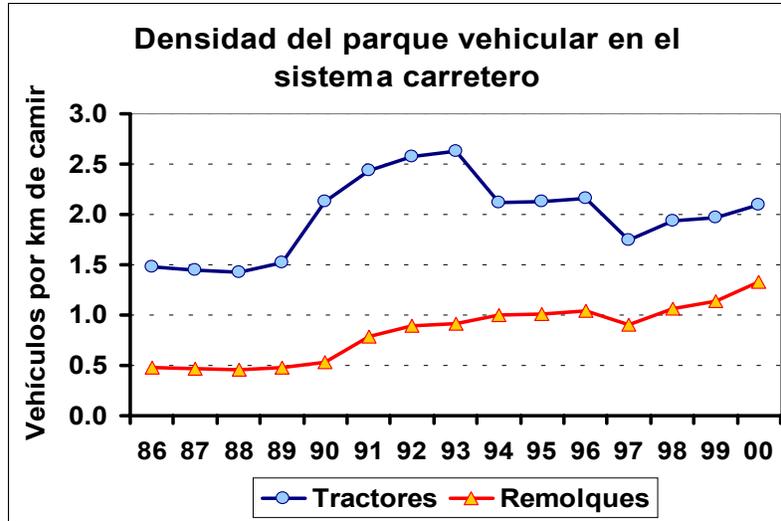


Figura 2.6. Densidad de parque vehicular en carreteras (veh/km) (basado en IMT, 2001)

Los cambios descritos muestran una reestructuración del sector del autotransporte en México, impulsado desde el principio por la planificación gubernamental. Esta circunstancia inmediatamente representó un reto para los planificadores, en particular a aquellos relacionados con el mantenimiento carretero. Como uno de los primeros pasos para abordar la problemática, la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) a través del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) inició en 1991 el *Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional* (EECAN), para coleccionar información básica sobre el transporte carretero de carga. Basándose en la idea de que el conocimiento habitual que se tiene del transporte proviene de fuentes administrativas como permisos, concesiones, pagos de impuestos, facturas, etc, los cuales no dan información suficiente para lograr una imagen realista de los movimientos de carga en los caminos, este estudio se ha convertido en una tarea anual.

El estudio estadístico de campo registra información sobre el tipo de camión usado, su peso y dimensiones; la clase de carga y las toneladas llevadas; el tipo de embalaje empleado, el origen y destino de los movimientos, y la identificación del tipo de mercado para el movimiento: doméstico o internacional. Cada estación de muestreo opera durante una semana, coleccionando información de todos los vehículos de carga que cruzan día y noche; las estaciones, además cuentan con el apoyo y vigilancia de la Policía Federal de Caminos (Rico, et al, 1997). En la tabla 2.1 se muestra el número de estaciones de muestreo instaladas en el periodo 1991-2001, así como el número de vehículos registrados en cada año (Gutiérrez y Mendoza, 2002).

Entre los primeros resultados que surgieron de este estudio de campo, se tuvo una estimación de los niveles de sobrepeso en el autotransporte de carga en México. La fig 2.7 incluye porcentajes de camiones con sobrepeso observados en las muestras de tráfico tomadas de 1994 a 1997.

Tabla 2.1. Estaciones de muestreo y vehículos registrados. Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional. 1991-2001 (Gutiérrez y Mendoza, 2002)

Año	No. de estaciones	Vehículos registrados	Vehículos por estación (promedio)
1991	10	126,196	12,620
1992	3	34,176	11,392
1993	6	37,297	6,216
1994	27	189,007	7,000
1995	21	107,388	5,114
1996	11	65,925	5,993
1997	20	128,619	6,431
1998	13	69,506	5,347
1999	7	78,910	11,273
2000	4	52,587	13,147
2001	21	91,047	4,336

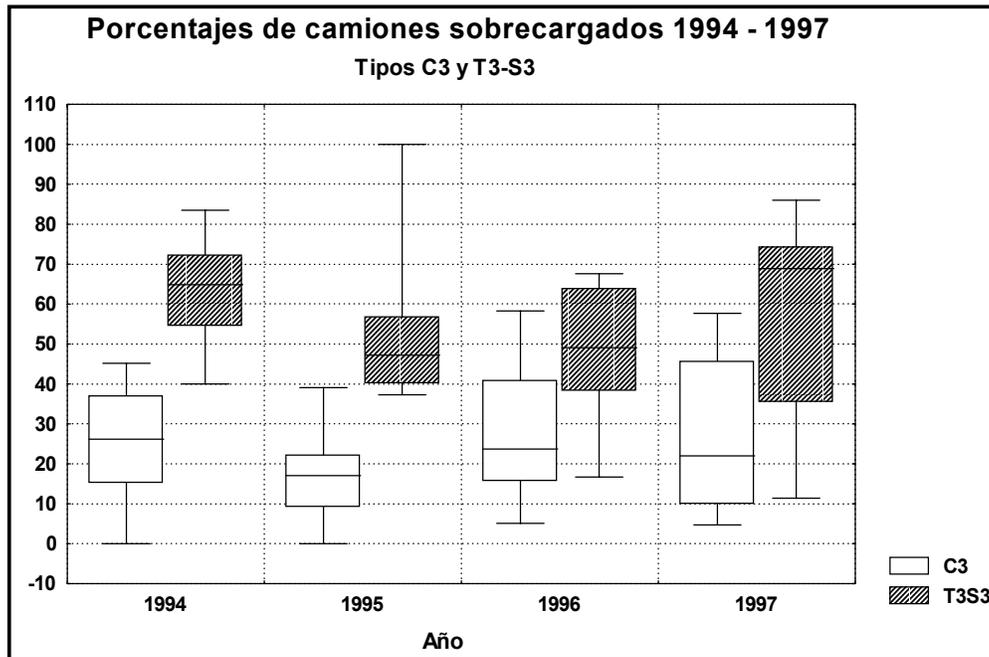


Figura 2.7. Porcentajes de camiones sobrecargados. Tipos C3 y T3S3. Datos 1996. (basado en Durán, Gutiérrez y Mendoza, 1996; Gutiérrez, Mendoza y Dontchev, 1999; Gutiérrez y Mendoza, 2000)

En la fig 2.7 se ven los porcentajes de sobrepeso para el camión rígido y el camión articulado que con las mayores proporciones de toneladas movidas en sus categorías (el camión rígido de tres ejes y el articulado de seis ejes, respectivamente). Los valores de las medianas (50% de los casos) para el caso del tipo rígido están alrededor del 20% y de no menos de 40% para el tipo articulado. Más detalles sobre la ocurrencia del sobrepeso en México se darán en el capítulo 5.

Basándose en este estudio de campo, datos adicionales tales como el valor económico de los productos movidos, los flujos de vehículos vacíos y el factor de carga utilizado en el transporte de carga pueden obtenerse, mejorando de esta manera el conocimiento que se tiene del autotransporte de carga.

2.2 La planeación en el autotransporte de carga norteamericano

En 1991, la Ley de Eficiencia en el Transporte Intermodal (Intermodal Surface Transportation Efficiency Act) en los Estados Unidos impuso a los estados norteamericanos y a las organizaciones y agencias de planeación urbana, el que tomaran en cuenta los movimientos urbanos de carga en la elaboración de todo proceso de planeación del transporte a largo plazo. En 1992, el Departamento de Transporte norteamericano (US DOT) junto con otras agencias federales estadounidenses emprendieron el Programa de Mejoramiento del Modelo de Viajes (*Travel Model Improvement Program*) (TMIP), un programa multianual y con participación de varias agencias con el objetivo de desarrollar nuevas prácticas de modelación de la demanda de transporte en una amplia variedad de modos y circunstancias operativas. Uno de los primeros documentos con orientación hacia el transporte de carga surgidos de este programa fue el Manual de Carga de Rápida Respuesta (*Quick Response Freight Manual*), que proporcionaba a los planificadores datos sobre los sistemas de transporte de carga, información sobre los factores que determinan la demanda de transporte, así como técnicas sencillas y parámetros transferibles que podían ser utilizados por los planificadores en sus estudios de pronóstico de movimientos de carga carreteros (TMIP, 1996).

Un programa mucho más específico hacia el transporte de carga, fue el Marco de Análisis para Carga (*Freight Analysis Framework, FAF*), creado por la administración federal de carreteras norteamericana (*Federal Highway Administration, FHWA*) con el fin de estudiar las relaciones geográficas entre los flujos de carga y la capacidad en las autopistas. Con la guía de estas relaciones, áreas con problemas de capacidad o infraestructura subutilizada podían administrarse conjuntamente a fin de aprovechar de la mejor manera el sistema de transporte. Las bases de datos del FAF dan información detallada de los flujos de carga en los modos carretero, ferroviario, aéreo y marítimo-fluvial, incluyendo pronósticos del transporte de carga para 2010 y 2020. En la fig 2.8 se muestran los valores proyectados de las toneladas movidas, tal como aparecen en la página Web de la FHWA; iniciando con 10,858 millones de toneladas reportadas en 1998, valores de 15,663 y 19,199 millones de toneladas se pronostican para 2010 y 2020, respectivamente (FHWA, 2002).

En relación con el reparto modal del transporte de carga terrestre, las figs 2.9 a 2.11 describen su evolución. La fig 2.9 muestra el reparto modal de los flujos de carga en el comercio internacional dentro del TLCAN, en el periodo 1997-2000, y

en la fig 2.10 se muestran tanto toneladas movidas como los valores de todos los productos transportados por todos los modos en el año 2000.

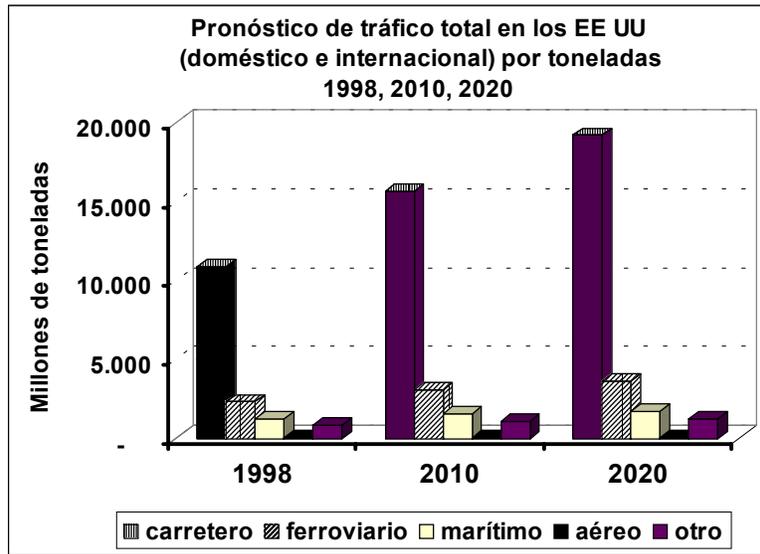


Figura 2.8. Pronóstico de tráfico en los EE UU, 1998, 2010, 2020. Adaptado del FAF: *Freight Analysis Framework* (FHWA, 2002)

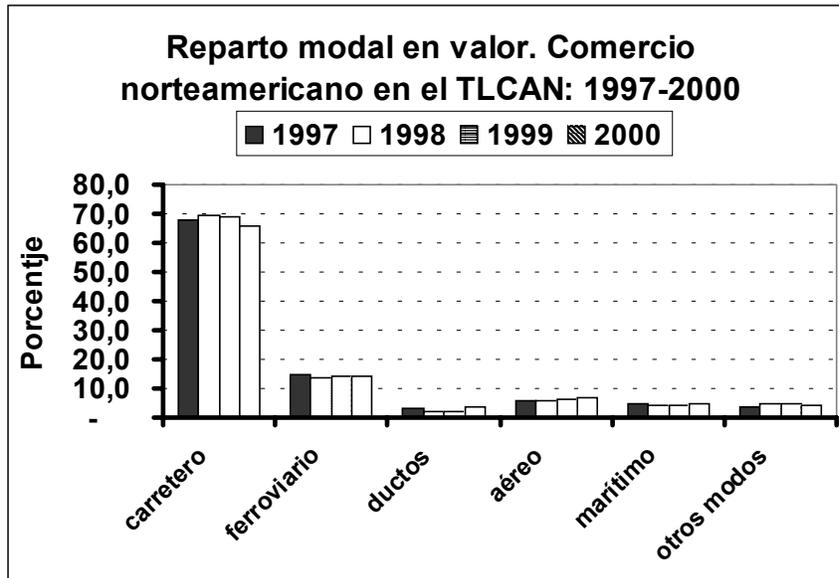


Figura 2.9. Reparto modal por valor. Comercio internacional norteamericano en el TLCAN 1997-2000. Fuente: "North American Trade & Travel Trends". (US DOT, 2001)

Estas gráficas revelan sin duda el predominio del transporte carretero en el movimiento de productos de gran valor, así como su importante participación en las toneladas movidas, cercana a la del modo marítimo-fluvial, que en contraste tiene muy poca participación en el movimiento de productos de gran valor.

Las toneladas-kilómetro producidas en el transporte de carga norteamericano en el periodo 1990 –1999 se muestran en la fig 2.11, donde se nota claramente que los únicos modos con incrementos significativos son el autotransporte y el ferrocarril. En particular para el ferroviario, esta tendencia creciente que va en paralelo con la del autotransporte, podría estar relacionada más bien con las grandes distancias que en promedio recorren los ferrocarriles norteamericanos, que con la cantidad de toneladas que se mueven por este modo.

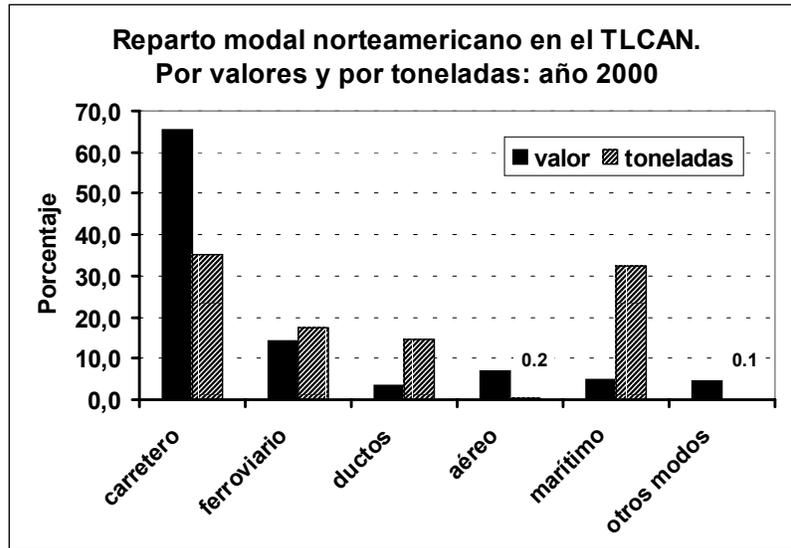


Figura 2.10. Reparto modal en EE UU por valor y por toneladas en 2000. Fuente: “North American Trade & Travel Trends”. (US DOT 2001)

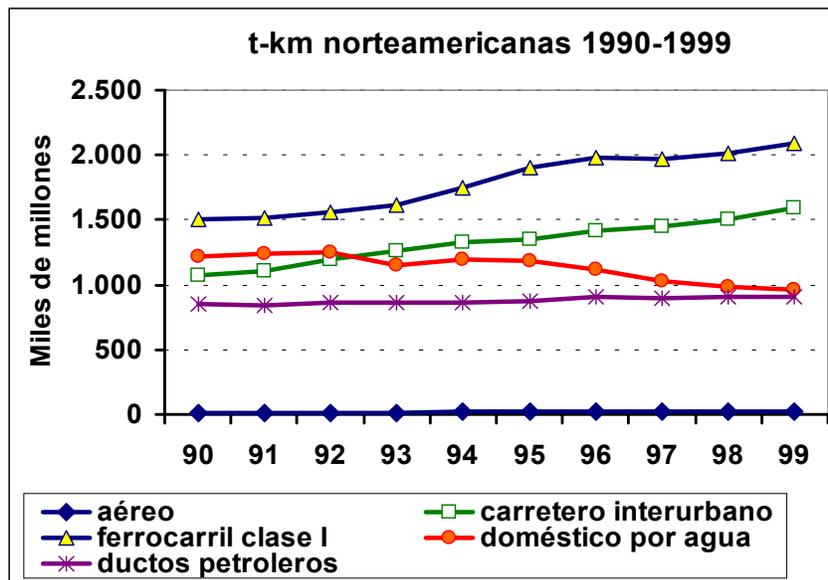


Figura 2.11. t-km norteamericanas por modo. 1990-1999 (US Bureau of Transport Statistics, 2001)

Este notorio dinamismo del transporte carretero de carga, que apunta directamente a la cuestión de los inevitables impactos en la infraestructura, ha tenido un contrapeso en las medidas de control que se han adoptado en los Estados Unidos. La fig 2.12 muestra el número total de vehículos que se pesaron para verificar el cumplimiento de la reglamentación estadounidense entre 1997 y 2001; se incluyen en estos datos vehículos pesados tanto en básculas fijas como aquellos detectados con equipo de pesaje dinámico (Weigh-in-motion, WIM).

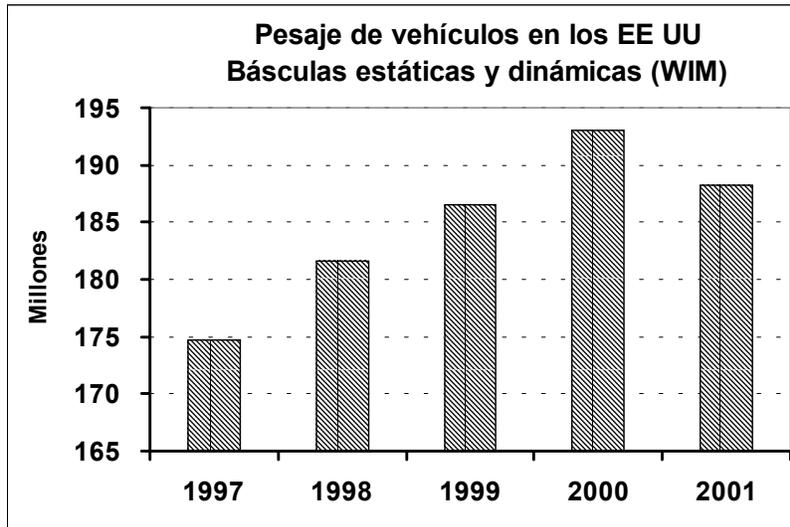


Figura 2.12. Pesaje de camiones norteamericanos 1997-2001. (FHWA, Office of Freight Management, [online] <http://www.ops.fhwa.dot.gov/freight/regulate/sw/tables.htm>)

El número de multas levantadas a camiones con sobrepeso en el mismo periodo se muestra en la fig 2.13, clasificadas según la modalidad específica en que se presentó la sobrecarga: a) peso excedido en los ejes; b) PBV excedido; y c) incumplimiento de la llamada “fórmula de puentes” (bridge formula). Esta fórmula de puentes es una prueba específica para los camiones que toma en cuenta el número de ejes en el vehículo, sus correspondientes pesos y las distancias entre ellos, con el fin de limitar el daño potencial que el camión llega a causar en puentes.

En la fig 2.13 puede notarse que el número de multas debidas a un exceso de peso en los ejes, así como el incumplimiento de la fórmula de puentes son mucho más numerosas que las multas por exceso de peso bruto vehicular. Esto pudiera relacionarse con la mayor dificultad que tienen los operadores de verificar pesos en ejes particulares en comparación con la relativa facilidad de verificar el PBV, además de que es posible que un camión no se exceda en su peso bruto y aún así pudiera tener alguno de sus ejes con sobrepeso.

El intenso esfuerzo de verificaciones de peso que se muestra en la fig 2.12 contrasta con los números relativamente estables de multas en la fig 2.13; en particular para las violaciones al PBV máximo autorizado. Esta respuesta casi

constante de los camiones que sobrecargan ante la intensidad creciente del esfuerzo de verificaciones de peso que se ha mostrado en esos años indica la necesidad de examinar tanto el nivel adecuado del esquema de revisiones de peso como de los niveles de multa que se encuentren en vigor.

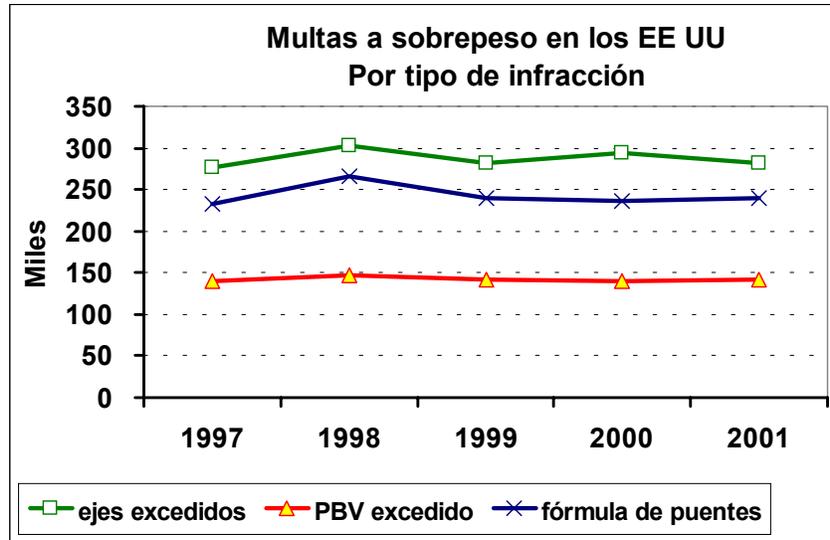


Figura 2.13. Multas por sobrepeso en los E.E.U.U. 1997-2001. (Fuente: FHWA, Office of Freight Management, [online] <http://www.ops.fhwa.dot.gov/freight/regulate/sw/tables.htm>)

Con la experiencia de los trabajos dentro del FAF y a partir de discusiones con varios actores involucrados en la industria del transporte de carga, las estrategias norteamericanas para mejorar el autotransporte de carga, adoptaron un enfoque geográfico incluyendo tanto corredores domésticos como los de comercio internacional, señalando dos tipos generales:

1. La necesidad de tener un entorno institucional que apoye el trabajo de identificación y de seguimiento de los temas críticos para el transporte de carga, así como la evolución de los procesos de solución
2. La necesidad de tener un mecanismo de financiamiento amplio y sostenible para dar soporte a la implantación de proyectos selectos para mejorar el transporte de carga

Todas estas iniciativas y trabajos revalúan el papel que tiene el transporte de carga en la economía norteamericana, en contraste con la política común de finales de los años 90, que se centraba casi por completo en el transporte de pasajeros. Adicionalmente, el reconocimiento abierto de la necesidad de un cuerpo institucional dedicado al análisis y solución de problemas en el transporte de carga, así como el acceso a financiamiento expresamente etiquetado para apoyar proyectos en el transporte de carga contribuye a formar estándares de referencia, que sirven de guía a los planificadores del transporte en otros países.

2.3 La problemática en Europa

La visión europea del transporte de carga está estrechamente ligada al esfuerzo integracionista que implicó el gran proyecto de la Unión Europea (UE). A finales del siglo 20, la UE contaba con quince países miembros: Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Grecia, Holanda, Irlanda, Italia, Luxemburgo, Portugal, Reino Unido y Suecia. El reparto modal de las toneladas-kilómetro en el transporte de carga para los quince países de la Unión Europea (UE15) en 1970, 1980, 1990 y 2000 se muestra en la fig 2.14. El predominio de los modos carretero y marítimo resulta evidente en esta gráfica. Aún más, el modo carretero tiene la mayor participación desde 1990, a la vez que el ferroviario presenta una tendencia decreciente en todo el periodo.

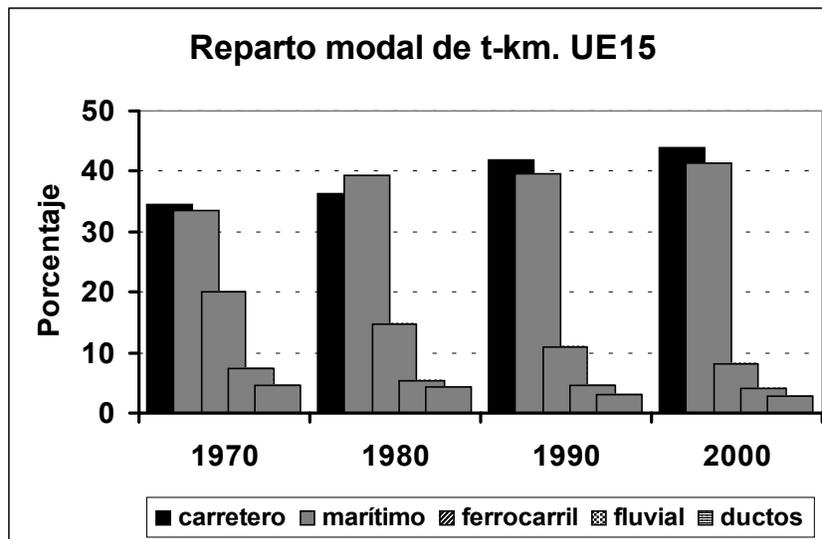


Figura 2.14. Reparto modal de t-km. EU15 (European Comisión, 2002)

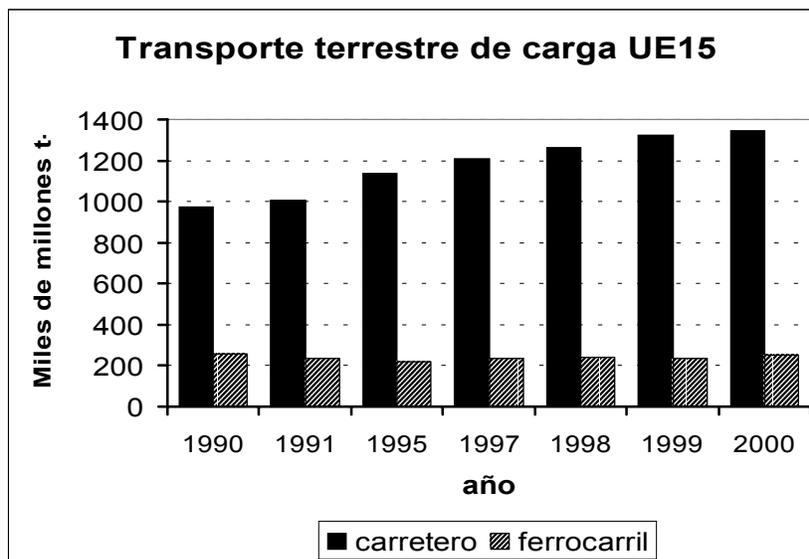


Figura 2.15. t-km en los países de la UE15 (European Commission, 2002)

La red europea y los cargos a usuarios

El objetivo de tener un mercado común europeo se liga directamente a la necesidad de una infraestructura unificada que sirviera a todas las necesidades de transporte de carga en este mercado; esto es, una *red europea de transporte*. Esta idea, tan vieja como la del mercado común, surgió en el libro blanco de la UE titulado *Desarrollo futuro de la política común del transporte (Future development of the common transport policy)*, donde se propuso la formación de la Red Transeuropea de Transporte (*Trans-European Transport Network, TEN-T*) a través de la interconexión de las redes nacionales de los países miembros, a fin de promover la interoperabilidad y apoyar la implantación de medidas de control ambiental. El propósito de la red transeuropea fue combinar las quince redes nacionales en una sola red europea por medio de la remoción de los cuellos de botella existentes, y el mejoramiento de la conectividad logrado mediante la adición o modernización de enlaces donde fuese necesario.

Consistentemente con esta aspiración, el uso perdurable de esta Red requiere de un mecanismo para un mantenimiento y reparación apropiados, por lo que las cuestiones referentes a los impactos del autotransporte de carga en las infraestructuras resultan relevantes. Los impactos a la infraestructura ocasionados por el tráfico de carga se han evaluado y controlado de distintas maneras entre los países miembros de la UE. Pese a los diferentes niveles de atención que se ha dado a esta materia, en términos generales puede decirse que la verificación del peso en los camiones cargados ha sido una práctica común en Europa. Un ejemplo de encuestas de pesaje en el Reino Unido, se ilustra en la fig 2.16.

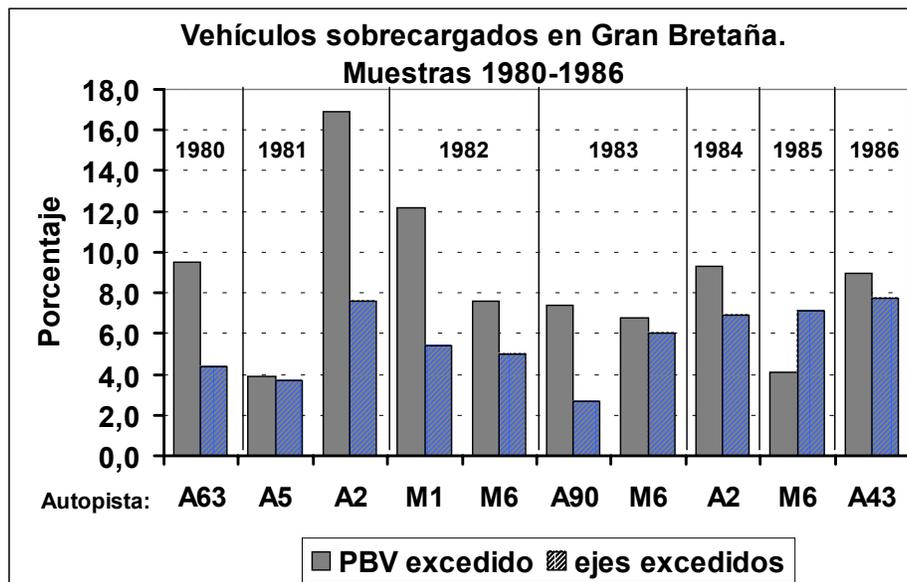


Figura 2.16. Vehículos británicos con sobrepeso. Muestras 1980-1986 (Shane y Newton, 1988)

La fig 2.16 muestra los resultados de diez encuestas de camino entre 1980 y 1986 en diferentes carreteras británicas, en las cuales se pesaron 12.398 camiones, lográndose así una evaluación de los porcentajes de vehículos con sobrecarga tanto en el peso bruto como en los ejes. Los inspectores utilizaron equipo de pesaje móvil, o básculas para uso a bajas velocidades para coleccionar los datos de los camiones (Shane y Newton, 1988). En la fig 2.16 se puede notar que las violaciones al peso bruto vehicular son más comunes que las correspondientes al peso máximo autorizado en los ejes, con excepción del lugar de encuesta en la carretera M6. La gráfica mostrada coincide con los resultados de la encuesta estimados por Shane y Newton (1998, p.20) quienes estimaron porcentajes del 8% para los vehículos excedidos en PBV y 5.4% para los vehículos que dentro del límite autorizado de PBV, pero con uno o más ejes excedidos de peso.

También se han ensayado métodos de pesaje más rápidos que usan dispositivos de medición dinámica. En un estudio de camiones de carga patrocinado por la OCDE en 1984, se coleccionaron datos de camiones sobrecargados a partir de mediciones dinámicas en varios países (OCDE, 1988). En Europa siete países tomaron parte: Finlandia, Francia, Italia, Alemania, Holanda, Noruega y la Gran Bretaña, logrando pesar un total de 728,900 camiones entre 1984 y 1985. De acuerdo este estudio, el caso británico fue especial, pues los vehículos de hecho se seleccionaron al azar en las autopistas, y luego se pesaron en básculas para uso a baja velocidad (OCDE, 1988, p. 48). Los porcentajes de camiones que excedían los límites autorizados se muestran en la fig 2.17, donde la misma tendencia del caso británico de la fig 2.16, con mayor incidencia en las violaciones al máximo PBV autorizado en comparación con las del límite de peso en los ejes, puede observarse para Finlandia, Francia, Italia y Alemania.

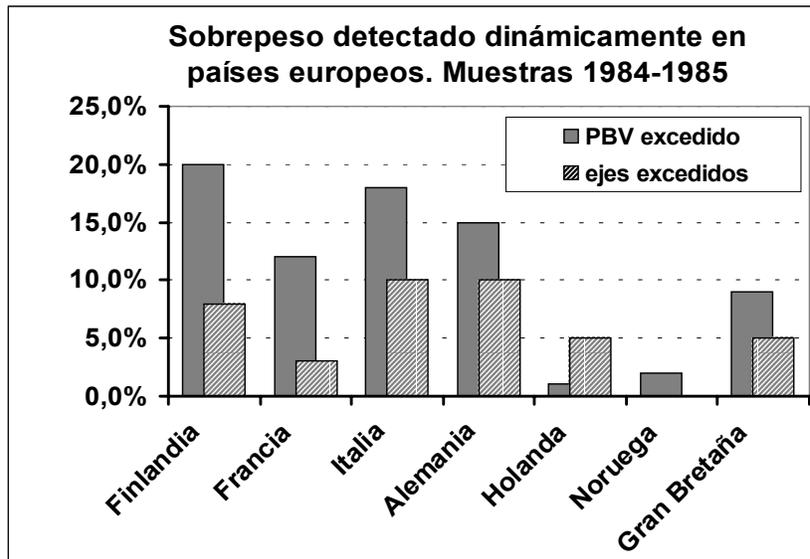


Figura 2.17. Sobrepeso en algunos países europeos (OECD, 1988)

Un proyecto europeo más reciente y de mayor alcance acerca de los impactos del autotransporte de carga en caminos y puentes es el *Experimento de Interacción Dinámica entre Vehículo e Infraestructura (Dynamic Interaction Between Vehicle and Infrastructure Experiment)* (DIVINE), el cual ha reunido evidencia científica de los efectos dinámicos que los vehículos de carga y los tipos de suspensión que utilizan, tienen sobre caminos y puentes. Utilizando pruebas dinámicas aceleradas, este proyecto ha explorado los beneficios de los sistemas de suspensión neumática comparados con el tipo convencional de suspensiones de acero, demostrando que el desgaste del pavimento sometido a un tránsito vehicular que usa suspensiones de acero es por lo menos 15% mayor al que se tendría con el mismo tránsito utilizando suspensión de aire (OCDE, 1998).

Estos estudios sobre ocurrencia de sobrepeso han guiado la investigación del tema, subrayando tanto la conveniencia de tener representaciones apropiadas del problema, como la importancia de entender la relación entre el impacto del daño al pavimento, y el tipo de vehículo que lo ocasiona.

Por otra parte, todos estos esfuerzos de verificación de peso de los camiones han sido el antecedente natural de los análisis sobre cargos a usuarios del camino. Después de prolongadas discusiones sobre la aplicación de cargos a los camiones de carga, el Parlamento Europeo aprobó en 1996 la “Directiva de la Euroviñeta”, un nuevo esquema de cargos diseñado para ajustar el nivel de la tarifa de acuerdo con el impacto causado por los camiones.

El esquema de tarifas clasificó a los camiones en tres categorías: EURO-0; EURO-I; y EURO-II, dependiendo de su impacto en el medio ambiente y sobre la infraestructura, reduciendo el cobro a los camiones menos contaminantes; del mismo modo, los camiones menos pesados tienen cargos menores. La tabla 2.2 muestra los cargos anuales máximos que fueron propuestos para los camiones de tres y cuatro ejes, para aplicarse a partir del 01/julio/2001.

Tabla 2.2. Cargos a camiones rígidos en la CE (European Commission, 1993).

CARGO ANUAL. EUROVIÑETA (Euros)		
Tipos de Combustión/Peso	máximo 3 ejes	mínimo 4 ejes
EURO-0	960	1550
EURO-I	850	1400
EURO-II y menos contaminante	750	1250

La posición estratégica de Suiza (que no está en la Unión Europea) en la parte central de la Red Transeuropea aunada al fuerte compromiso de este país de conservar el ambiente alpino, hizo que durante mucho tiempo se prohibieran camiones cargados con más de 28 toneladas en las carreteras suizas. Negociaciones de la UE con Suiza lograron relajar esta política, permitiendo la entrada de camiones con mayores PBV, siempre y cuando éstos compensaran su

impacto mediante un sistema impositivo desarrollado por las autoridades suizas (European Commission, 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 t y hasta un máximo de 34; esto incluyó tanto a camiones suizos como extranjeros. Se espera que en 2005 el límite de peso autorizado en Suiza alcance las 40 t. *Las cuotas se calculan por tonelada-kilómetro*, y están diferenciadas en tres niveles: 1, 2 y 3 correspondientes a la clasificación europea: EURO-0; EURO-I; y EURO-II/III. La tabla 2.3 muestra este esquema tarifario.

Tabla 2.3. Tarifa suiza para vehículos de carga (AFD, 2000)

TARIFA SUIZA PARA VEHÍCULOS		
DE CARGA		
Tarifa por tonelada y por kilómetro (tkm)*		
Nivel 1	Nivel 2	Nivel3
2	1,68	1,42
*(en centavos de franco suizo)		

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 t en adelante, que se programó 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). En la tabla 2.4 aparecen los cargos a usuarios en este esquema.

Tabla 2.4. Tarifa alemana para vehículos de carga.(FTA Online, 2003)

TARIFA ALEMANA CON BASE EN DISTANCIA (2003)			
Núm. de ejes	Nivel de emisiones del motor		
	IV + V	II + III	I + 0
3 o menos	9 cents/km	11 cents/km	13 cents/km
4 o más	10 cents/km	12 cents/km	14 cents/km

Estos esquemas tarifarios tienen en común el enfoque de cobros diferenciales con base en parámetros que reflejen el grado del impacto de los camiones, con lo que el procedimiento de cobro ha resultado ser una medida de control con diseño equitativo.

Este principio va en concordancia con las tendencias de las políticas de transporte en Europa, que tratan de 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.

3 Elementos de modelación del sobrepeso en el transporte carretero de carga

La modelación del transporte de carga se ha reconocido como un tema esencialmente diferente de su análogo cercano, que es el modelado de transporte de pasajeros.

Simplemente, al considerar la gran variedad de distintos productos que se mueven en las autopistas, con diferentes requerimientos de tipo de vehículo, clase de embalaje o necesidades de carga y descarga, todo ello controlado por un enjambre de actores que intervienen en el proceso tales como productores, consumidores, cargadores, operadores de transporte, agentes de carga, gerentes de almacén, concesionarios de autopistas y agencias gubernamentales de regulación, da una amplia idea de la complejidad de la tarea de modelado.

El ejercicio de modelación, sin embargo, tiene el beneficio de presentar un enfoque racional y organizado para abordar los problemas del transporte de carga, aun cuando las simplificaciones necesarias en cualquier modelo impidan la inclusión de todo el universo de factores que describen la actividad.

En este capítulo se presenta un marco de modelación para analizar el problema del sobrepeso en el autotransporte de carga. El enfoque usado es sistémico, el cual busca una descripción clara de los elementos que integran el sistema de transporte, las interrelaciones entre esos elementos, y las posibilidades de controlarlo a fin de alcanzar los objetivos de planeación que se hayan planteado.

Este punto de vista, que no se opone al enfoque habitual de los estudios de autotransporte de carga que se centran en objetivos económicos de productividad o eficiencia de las empresas o del mercado trata de representar el punto de vista del responsable del camino, quien debe encarar diversos problemas a fin de proporcionar niveles razonables de calidad y confiabilidad en el sistema de caminos que utilizan los operadores del transporte de carga.

3.1 Los impactos del autotransporte de carga

Los impactos del tráfico de carga, igual que los que se generan en el de automóviles y autobuses, afectan tanto a los propios vehículos como a su entorno. La congestión que resulta de los flujos vehiculares en aumento, reduce la velocidad de los vehículos a la vez que se generan emisiones que dañan la salud y el medio ambiente. Numerosas políticas, tales como cargos a usuarios de autopistas, cargos de congestionamiento (p ej el esquema londinense puesto en marcha en 2003), carriles dedicados o transporte público mejorado se han diseñado con el fin de reducir los grandes volúmenes de vehículos y así mitigar sus efectos.

Mientras que la congestión y las emisiones contaminantes son típicos efectos negativos del tránsito de automotores que combinan costos privados y sociales, los retrasos en la entrega de embarques y el daño al camino, son impactos negativos del autotransporte de carga. De manera análoga a la reducción de velocidad que sufre un automóvil cuando el flujo vehicular se incrementa en una autopista, los camiones de carga disminuyen su velocidad a medida que más toneladas llevan, lo que aumenta sus tiempos de recorrido. El retraso en las entregas de embarques, claramente tienen relación con la congestión presente en el camino, pero las prácticas de carga del camión tienen también una influencia.

Impactos en el desempeño del camión

El hecho de que los camiones tengan una cantidad fija de potencia disponible en sus motores tanto para efectuar el movimiento como para sortear las condiciones de camino que se encuentren, implica tener que aceptar un balance entre el tonelaje que el camión puede movilizar y la velocidad con la que puede transitar. La fig 3.1 muestra la variación en la velocidad (km/h) con el número de toneladas movidas para dos camiones de carga típicos: uno mediano de 16 t de PBV, y uno articulado de 45 t de PBV.

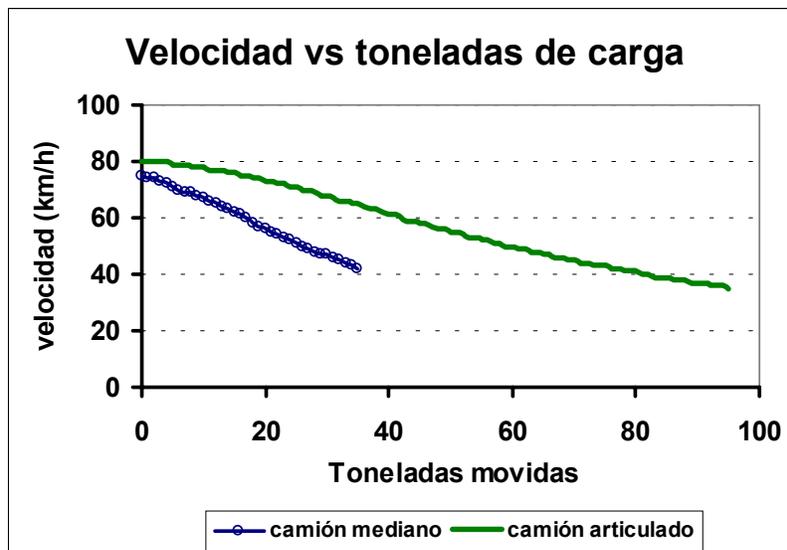


Figura 3.1. Variación de la velocidad vs toneladas movidas (con base en corridas del paquete HDM-VOC v 4.0 con los vehículos muestra)

Las curvas de la fig 3.2 se obtuvieron corriendo el paquete computacional HDM-VOC v 4.0 del Banco Mundial, el cual puede calcular algunos de los consumos físicos y los costos de operación de los vehículos para una variedad de tipos de camión y de condiciones de camino elegidos por el usuario del software. El paquete hace los cálculos suponiendo que no hay congestionamiento en el camino. El modelo computacional proviene de un extenso programa del Banco Mundial: el Estudio de Estándares de Diseño y Mantenimiento Carretero (*Highway Design and Maintenance Standards Study*) conocido por sus siglas en inglés como HDM. Varios experimentos y encuestas entre usuarios realizadas en Kenia, Brasil,

la India y en países del Caribe generaron una enorme cantidad de conocimientos sobre los costos de operación vehicular bajo una diversidad de condiciones del camino, y mucho de esto se adaptó en el modelo a las condiciones especificadas por el usuario del paquete (Archondo-Callao y Faiz, 1994, pp. 6-10). En el Anexo A se muestra un reporte típico del HDM-VOC v 4.0 con los datos usados y los resultados para uno de los vehículos muestra que se incluye en el paquete, el camión mediano de 16 t de PBV.

Se pueden obtener mejores comparaciones para el desempeño de los camiones utilizando el *factor de carga* del vehículo (definido como la razón de las toneladas movidas a la carga útil del vehículo) en lugar de las toneladas de carga transportadas. La fig 3.2 muestra la curva de velocidad contra factor de carga para dos de los camiones muestra en el HDM-VOC v 4.0, la cual presenta una semejanza con el clásico diagrama velocidad-flujo que se usa para discutir los efectos de la congestión en el tráfico de automóviles. La fig 3.3 muestra indica el correspondiente incremento en el tiempo unitario de recorrido, en minutos por kilómetro.

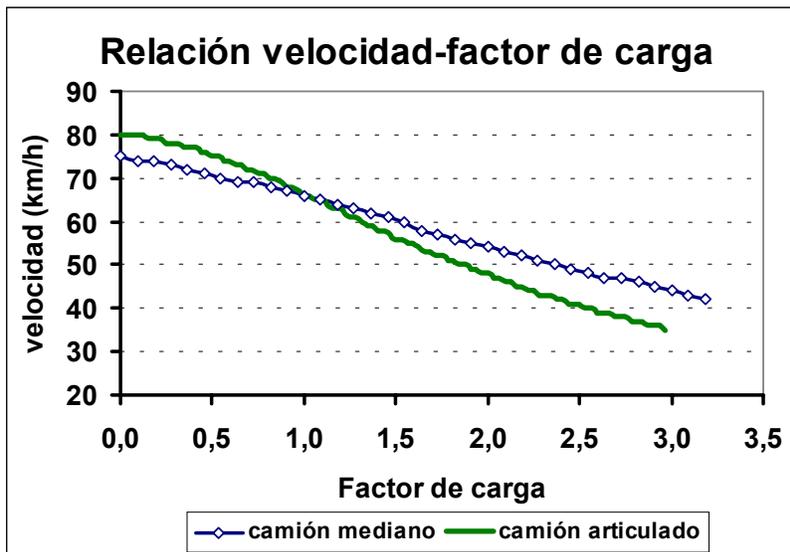


Figura 3.2. Relación velocidad – factor de carga. (con base en corridas del paquete HDM-VOC v 4.0 con los vehículos muestra)

Esta reducción en velocidad a medida que se mueven más toneladas resulta de la disponibilidad de potencia en el motor. La potencia tiene el significado físico de transferencia de energía por unidad de tiempo, energía que proviene del motor del vehículo. El peso total del vehículo (carga incluida) tiene que ser movido con esta potencia, lo que explica por qué la razón entre potencia y peso resulta un indicador básico para describir el desempeño de un vehículo.

En comparación con los automóviles, los camiones tienen un peso mucho mayor cuando van completamente cargados, de manera que cada unidad de peso tiene una menor porción de la energía del motor para ser movida.

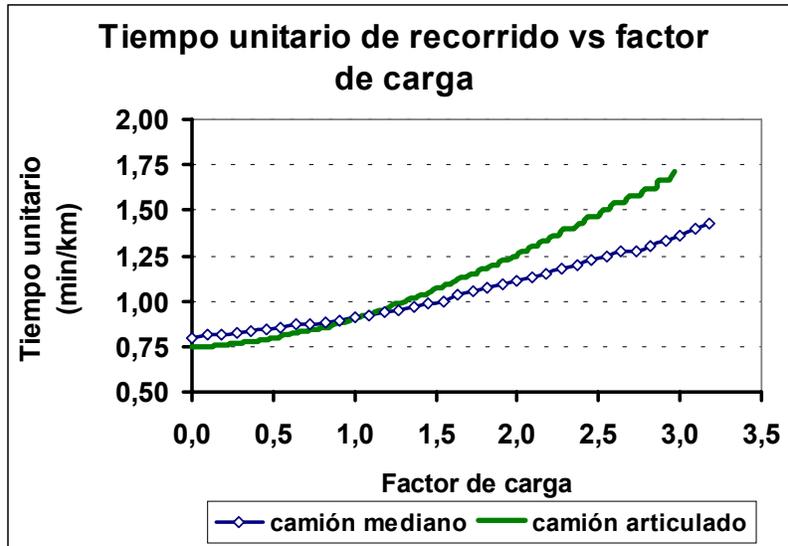


Figura 3.3. Variación del tiempo unitario de recorrido con el factor de carga (basada en corridas del paquete HDM-VOC v 4.0 con los vehículos muestra)

La fig 3.4 muestra las relaciones potencia-peso para cuatro distintas marcas de automóviles modernos: BMW 840Ci; Jaguar S-Type 3.0i; Rover 75 2.0i; y Ford Focus 1.8 (Bosch, 2000, pp. 903-918), así como para los camiones muestra en el paquete HDM-VOC v 4.0, tanto vacíos como con carga completa. La disponibilidad de potencia por tonelada en cada tipo vehicular explica la capacidad de los automóviles para alcanzar grandes velocidades, y las correspondientes bajas velocidades en los camiones.

La energía del motor en cualquier vehículo tiene que vencer la resistencia al rodamiento, la resistencia por la pendiente y la resistencia aerodinámica. Las dos primeras fuerzas de resistencia al movimiento se incrementan al aumentar el PBV; mientras que la resistencia del aire al movimiento es proporcional al cuadrado de la velocidad del vehículo (Archondo y Faiz, 1994, p. 35; Bosch, 2000, p. 339). Una vez que estas fuerzas están en equilibrio, la transferencia de energía proporcionada por el motor del camión determina la velocidad del vehículo.

Al incrementarse la carga movida por el camión, tanto el PBV como las resistencias de rodamiento y de la pendiente se incrementan también, dejando menos potencia disponible para el movimiento, con lo cual la velocidad se reduce. Si el camión trata de mantener su velocidad de operación original, más potencia es requerida, la cual resulta de aumentar las revoluciones por minuto del motor, es decir, proviene de un mayor consumo de combustible. De este modo, un camión con una velocidad de operación determinada consumirá más combustible a medida que más toneladas mueve.

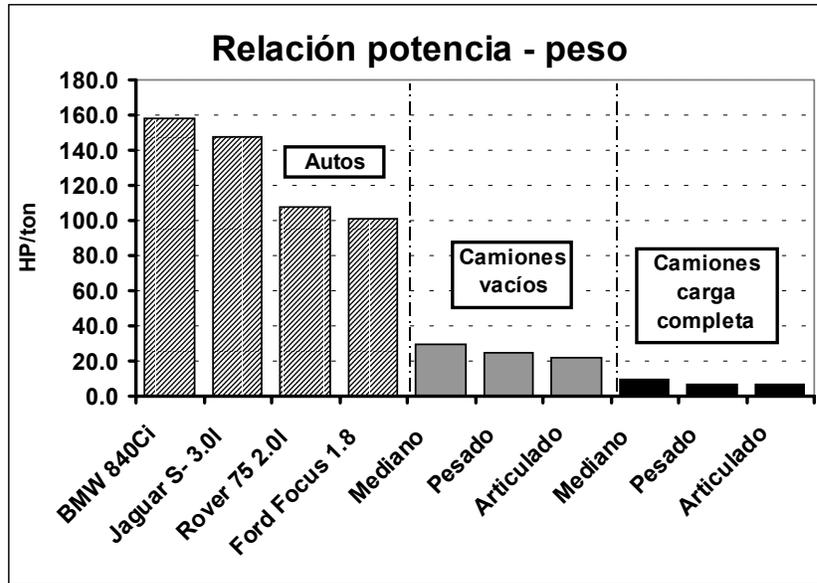


Figura 3.4. Relaciones potencia-peso para automóviles y camiones (Bosch, 2000; World Bank's HDM-VOC v 4.0)

Por otra parte, los camiones que mantienen velocidades más bajas al llevar mayores tonelajes permanecen tiempos más largos en el camino, consumen más combustible y generan más emisiones contaminantes. En la fig 3.5 se muestra el consumo de combustible para los vehículos muestra del HDM-VOC v 4.0 ya mencionados, suponiendo un camino plano con buena superficie de rodamiento y una velocidad de operación de 60 millas por hora (96,6 km/h).

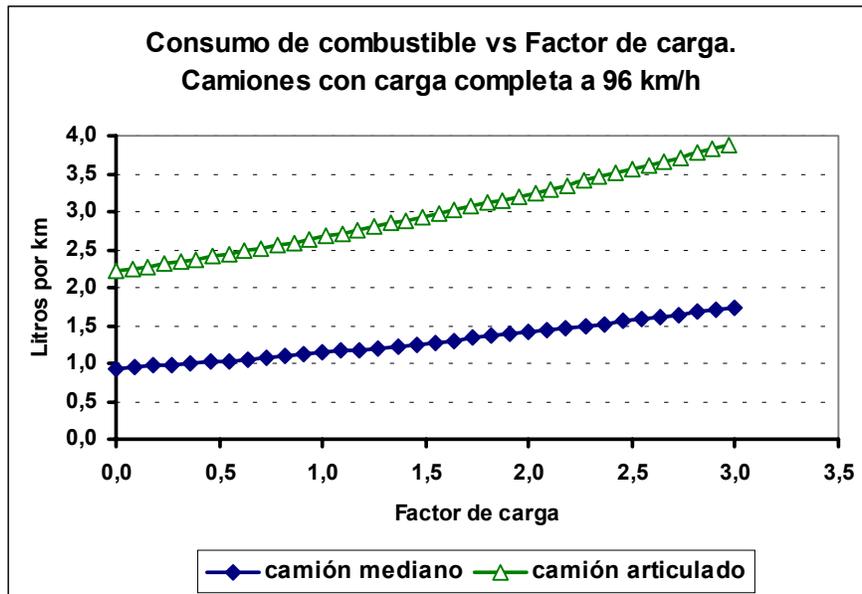


Figura 3.5. Consumo de combustible en camiones (basada en corridas del paquete HDM-VOC v 4.0 con los vehículos muestra)

El impacto del daño al camino

Siguiendo con la comparación entre los impactos del tráfico de automóviles, el daño al camino es un impacto que se ha atribuido exclusivamente al flujo de camiones de carga. El PBV mucho mayor de los camiones en comparación con el de los automóviles, y la aparente dependencia del daño al camino del peso en los ejes del vehículo como una ley polinomial de grado n-ésimo ($n \approx 4$), básicamente explica esta circunstancia. Esta teoría del daño al camino fue resultado de los experimentos de la asociación norteamericana de funcionarios estatales de carreteras (*American Association of State Highways Officials*), AASHO, entre 1958 y 1960. En este experimento se hicieron circular 200 vehículos a 35 millas por hora (56 km/h) sobre seis carriles de prueba construidos con distintos materiales expresamente para el experimento, hasta acumular el efecto de la aplicación de 1,1 millones de ejes sobre estos carriles de prueba (AASHO, 1962; Cebon, 1993, p. 9; Hotmix, 2004).

Del experimento de la AASHO surgió el concepto de Carga Equivalente de Ejes Estándar (*Equivalent Standard Axle Load*) conocido por las siglas ESAL, como una unidad para medir el daño al camino. Esta unidad apareció ligada a la “Ley de la 4ª. Potencia” que establece que el daño estructural al pavimento provocado por un eje dado es aproximadamente proporcional a la cuarta potencia de la razón de la carga en el eje al peso de un eje estándar de referencia. Un eje estándar de referencia de uso común es el de 18,000 libras (8.16 t), aunque ejes estándar de 10 t también se emplean en la Gran Bretaña (Fowkes, Nash y Tweedle, 1988, p.15). De este modo, un vehículo con **k** ejes tiene un factor de daño expresado en ESALs igual a:

$$Factor\ de\ da\~{n}o = \sum_{j=1}^k \left(\frac{Axle_j}{8.16} \right)^4 \dots \quad [3.1]$$

En términos operacionales, el factor de daño indica el número equivalente de pasadas de un eje estándar con el mismo efecto de desgaste en el pavimento, causado por el camión. Esta dependencia con respecto al peso del vehículo modelada como una función potencia de grado cuatro, hace que los costos de reparación del camino sean mucho muy sensibles a las prácticas de sobrepeso. La tabla 3.1 muestra los factores de daño en ESALs para varios vehículos británicos típicos suponiendo la ley de la 4ª. Potencia, tal como lo reportan Urquhart y Rhodes (1990, pp. 5-6).

En la tabla 3.1 puede notarse cómo al aumentar la carga en el camión, de media carga útil a carga completa (carro entero) se incrementa el factor de daño (en ejes equivalentes) de 0,529 a 2,709 (412% de aumento) para el camión de dos ejes, y de 0,857 a 4,836 (464% de aumento) para el de cuatro ejes.

Tabla 3.1 Capacidad de daño relativa de vehículos típicos (basada en Urquhart y Rhodes, 1990)

Tipo de vehículo	Peso típico en los ejes (en t)				PBV (en t)	Factor de daño (ESALs)	Daño respecto al auto familiar
	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4			
Auto familiar	0,5	0,5	-	-	1,0	0,00003	1
Comercial ligero	0,5	1	-	-	1,5	0,00024	8
Camión dos ejes							
vacio	3,06	3,06	-	-	6,1	0,039	1402
media carga	4,58	6,61	-	-	11,2	0,529	18792
carro entero	6,1	10,16	-	-	16,3	2,709	96320
Camión cuatro ejes							
vacio	4,0	3,2	1,7	1,7	10,6	0,085	3020
media carga	4,79	6,68	5,04	5,04	21,6	0,857	30464
carro entero	5,58	10,16	8,38	8,38	32,5	4,836	171903

Los operadores de transporte en general, no perciben de inmediato el dramático efecto que tienen las cargas en el pavimento, como pudiera ser el caso con otros impactos negativos del autotransporte tales como los accidentes o daños de consideración a los propios vehículos. De una manera más precisa, el impacto de un camión en la infraestructura depende de dos factores: el peso bruto vehicular (PBV) y los pesos en los ejes. Puesto que el pavimento sufre el efecto directo de los ejes (o grupos de ejes) más que el del PBV, mientras que el esfuerzo flexionante en los puentes de grandes claros que soporta es impactado directamente por el PBV, resulta que los pesos en los ejes del vehículo producen el efecto más importante en el pavimento y en los puentes de claros cortos, en tanto que el PBV tiene un efecto significativo en los puentes de grandes claros (US DOT, 2000).

La sensibilidad de los puentes al tráfico de carga está estrechamente ligada con la importancia relativa de las cargas que el puente debe soportar. Mientras que la *carga muerta* se refiere al peso del puente en sí mismo, la *carga viva* se refiere al peso de los vehículos en el tráfico que cruza el puente. De este modo, para un puente de claro corto (p ej de 12 m), cerca del 70% de la capacidad de soporte del puente podría requerirse para manejar el peso del tráfico vehicular; mientras que para uno de claro grande (p ej 300 m), alrededor del 75% de la capacidad de soporte podría necesitarse para sostener al puente mismo (US DOT, 2000).

A fin de proteger la infraestructura, los planificadores han impuesto límites tanto a los pesos vehiculares brutos como a los pesos en los ejes de los vehículos de carga. La tabla 3.2 ejemplifica límites de peso en algunos países de la Comunidad Europea. Los límites de pesos, como los de la tabla 3.2 dan a los transportistas una referencia rápida de los pesos máximos autorizados a fin de no dañar excesivamente la infraestructura.

Tabla 3.2 Límites a PBV y ejes en algunos países europeos (Department for Transport, 1997). (Nota: la reforma británica publicada en *The Road Vehicles (Authorised Weight) (Amendment) Regulations 2000*, de Dic/2000, permitió 44 t de PBV en Reino Unido a partir del 1/Feb/2000; Lowe, 2002, p. 282)

Límites de PBV a camiones (en t) para combinaciones articuladas en países de la Comunidad Europea				
País	Número de ejes			Peso máx. en ejes (en t)
	4	5	6	
Alemania (1)	36	40	40	11,5
Austria (2)	38	38	38	11,5
Bélgica	39	44	44	12
Dinamarca	38	44	48	11,5
España	38	40	40	11,5
Finlandia	36	44	53	11,5
Francia (3)	38	40	40	13
Grecia	38	40	40	11,5
Holanda	41	50	50	11,5
Irlanda	35	40	44	10,5
Italia	40	44	44	12
Luxemburgo	38	44	44	12
Portugal	38	40	40	12
Reino Unido (4)	35	38	38	10,5
Suecia	38	40	40	11,5
Directiva Límites CE (5)	38	40	40	11,5

(1) Alemania permite 44 t en 6 ejes para transporte intermodal
(2) Austria permite 5% de tolerancia, alcanzando en efecto 40 t
(3) Francia permite 44 t en 5 y 6 ejes para transporte intermodal
(4) Reino Unido permite 44 t en 6 ejes para transporte intermodal
(5) en movimientos internacionales

El daño al camino sin embargo, se evalúa comúnmente en términos de ejes equivalentes (ESALs) más que en número de toneladas que pasan por caminos y puentes.

Grandes valores de ESALs no solamente resultan de mayores valores de PBV, sino que también distintas distribuciones de la misma carga sobre la plataforma de un camión pueden incrementar los ejes equivalentes. En un ejemplo simplificado, Urquhart y Rhodes (1988, p.3) muestran el aumento en el factor de daño para un camión de cuatro ejes y 32 t de PBV, al cambiar una carga uniformemente distribuida en un eje tándem doble (ejes 3 y 4), a una distribución con una diferencia de 2 toneladas en los ejes. La tabla 3.3 muestra los cálculos de ESALs correspondientes.

Tabla 3.3 Efecto de una distribución desigual de carga en los ejes (Urquhart y Rhodes, 1988)

	Eje 1 (en t)	Eje 2 (en t)	Eje 3 (en t)	Eje 4 (en t)	GVW (en t)	Factor de daño (ESALs)	Aumento
Carro entero	5	9	9	9	32	4,570	4,8%
	5	9	8	10	32	4,789	
Vacío	4	4	2	2	12	0,122	9,2%
	4	4	1	3	12	0,134	

En un segundo ejemplo, la ventaja de mover carga en vehículos con más ejes resulta evidente una vez que los cálculos de ESALs son desplegados. La fig 3.6 ilustra las diferencias en factores de daño (ESALs) entre un camión articulado de cinco ejes y uno de seis ejes, ambos moviendo la misma carga de 38 t. El camión de cinco ejes aparece en dos configuraciones; primero, con tándem doble para los ejes 2+3 y 4+5, y luego con un tándem triple en los ejes 3+4+5. En comparación con el camión de seis ejes, las dos configuraciones de cinco ejes mostradas tienen factores de daño mayores por 84 y 148% respectivamente.

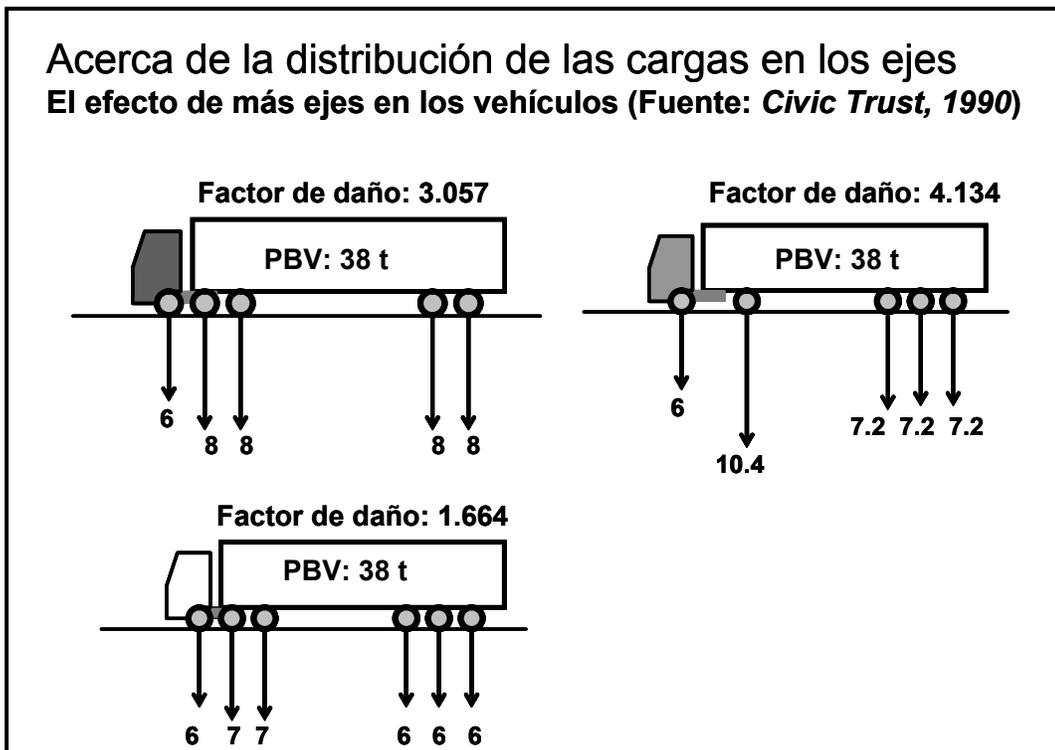


Figura 3.6 El efecto de más ejes en vehículos (basado en Civic Trust, 1990)

De esta manera, la relevancia de tener la carga distribuida en la plataforma de la manera más homogénea posible resulta clara. Lo que se ha expuesto demuestra

que el sobrepeso ocurre no solamente en el PBV, sino también en ejes (o grupos de ejes) individuales. Esta observación resalta el hecho de que algunos transportistas pudieran incurrir en sobrepeso de manera inadvertida, aun cuando sus camiones respeten los PBV máximos autorizados.

A pesar de su posición de referencia fundamental en la evaluación del daño al camino, la Ley de la 4a. Potencia se ha revisado en años recientes a fin de aclarar las críticas que ha recibido en particular, por el pragmatismo del método experimental originalmente usado por la AASHO en los años 60, y por la incertidumbre alrededor de la posibilidad de transferir los resultados que se obtuvieron, a caminos y vehículos de tipos distintos a los que se usaron en dichos experimentos.

Es así que un rango de valores para el exponente "4" de la Ley de la 4a. Potencia se han encontrado en la literatura, por ejemplo, Addis y Withmarsh (1981) reportan potencias que varían desde 3 hasta 6, con los exponentes más grandes apareciendo en pavimentos débiles, mientras que Cebon hace alusión a estudios que reportan valores desde 1.3 hasta 6 para pavimentos flexibles y valores altos de 8 a 12 en pavimentos compuestos y rígidos (Cebon, 1993, p. 10).

En un análisis econométrico de la durabilidad de los pavimentos, Small y Winston volvieron a examinar los datos generados por la AASHO en los experimentos originales, utilizando técnicas estadísticas avanzadas y encontraron que la relación entre la durabilidad del pavimento y el peso en los ejes estaba más cercana a una 3a. potencia que a la 4a. potencia, usada comúnmente como referencia (Small y Winston, 1988, p. 564). Este resultado coincide con investigaciones recientes que se basan más en las propiedades físicas de los materiales de construcción y de los pavimentos, y que han indicado que la relación entre el peso en los ejes y el daño para distintos tipos de pavimento no es uniforme. Aparentemente, la mayor parte del desgaste en los pavimentos norteamericanos tienen una relación menor a una cuarta potencia con los pesos en los ejes; y la relación global entre cargas en los ejes y daño al pavimento está cercana a una tercera potencia (US DOT, 2000, Chap. V, p. 4).

No obstante a las críticas que ha recibido, la Ley de la 4a Potencia aún se usa ampliamente por los planificadores e ingenieros de caminos cuando no se tienen datos particulares de las condiciones del pavimento; y cuando un punto de referencia para comparar distintos niveles de daño es requerido. A pesar de las revisiones recientes de la validez de este modelo de daño, el brusco incremento que se tiene en el impacto al camino difícilmente puede ser rechazado. Esta simple circunstancia le da derecho al responsable del camino a buscar mecanismos de compensación para mantener el daño al camino dentro de límites razonables, con iniciativas de medidas como cargos a usuarios de la autopista y esquemas de vigilancia, inspección y penalizaciones para los infractores de los reglamentos de pesos.

Las tablas y figuras previamente mostradas sugieren que a medida que más toneladas mueve un camión, mayores tiempos de recorrido se requieren, lo que en consecuencia incrementa los costos que aumentan con el tiempo, como los pagos de salario del conductor o las penalizaciones por retraso en la entrega; a la vez que crece el consumo de combustible. Al mismo tiempo, puesto que mover más carga significa mayor utilidad, el transportista enfrenta un problema de decisión; esto es, elegir el factor de carga más conveniente a utilizar; y esto de manera natural, abre la posibilidad de sobrecargar. Por tanto, para un transportista, el marco de decisión básico de sobrecargar o no, está en la utilidad potencial que podría obtener y en el riesgo que corre de recibir una infracción por violar el reglamento de pesos, si es detectado.

La práctica de sobrecargar, estimulada por el interés de los transportistas de aumentar su productividad y utilidades es un incidente común alrededor del mundo; un vistazo a este problema en México, los Estados Unidos y Europa se ha ilustrado ya en el capítulo 2. De manera que emerge naturalmente una situación que llama la atención de los responsables del camino, y que lleva a la búsqueda de medidas de control de los impactos resultantes, como son los reglamentos de pesos, el uso de suspensiones menos agresivas, las multas por sobrepeso, y los relativamente recientes progresos en la medición dinámica de peso (weigh-in-motion, WIM).

3.2 Un marco de referencia sistémico para el transporte carretero de carga

Dado el carácter plural que tiene el proceso de toma de decisiones en el transporte de carga, un enfoque sistémico que trate de capturar los elementos involucrados en la actividad así como sus interrelaciones, ha demostrado ser de utilidad.

Dicho enfoque permite ver con mayor claridad cuáles son los actores que intervienen en la generación del tráfico de carga; cuáles son sus principales indicadores de desempeño (p ej precios de mercado, tarifas, regulaciones); y quiénes son sus contrapartes que los limitan (la reglamentación que aplica a cargadores, transportistas, agentes de carga, etc), a fin de tener una visión amplia del sistema de transporte de carga que privilegie el punto de vista del planificador responsable de la infraestructura.

Como un primer paso, una representación gráfica del sistema de transporte que realce los componentes físicos y las variables relevantes en el proceso, se muestra en la fig 3.7.

Este tipo de diagrama es llamado *imagen enriquecida* (rich picture) (Checkland, 1999), que es una representación pictórica del sistema estudiado, en la cual las relaciones entre los elementos del sistema y las variables numéricas relevantes

pueden identificarse como un todo. Esta imagen enriquecida es una especie de “mapa” donde elementos pertinentes pueden ser agregados o eliminados de acuerdo a los propósitos del planificador, y tiene la ventaja de mostrar una vista panorámica, en lugar de la descripción lineal o secuencial que se encuentra en un reporte de texto.

Con base en esta imagen enriquecida, tres elementos, más bien que actores, son considerados como esenciales para el transporte carretero de carga: el transportista, el camino y el planificador responsable de la infraestructura. En la fig 3.8 se muestran estos tres elementos ligados con variables numéricas asociadas que representan variables de decisión, parámetros o impactos para los elementos enlazados.

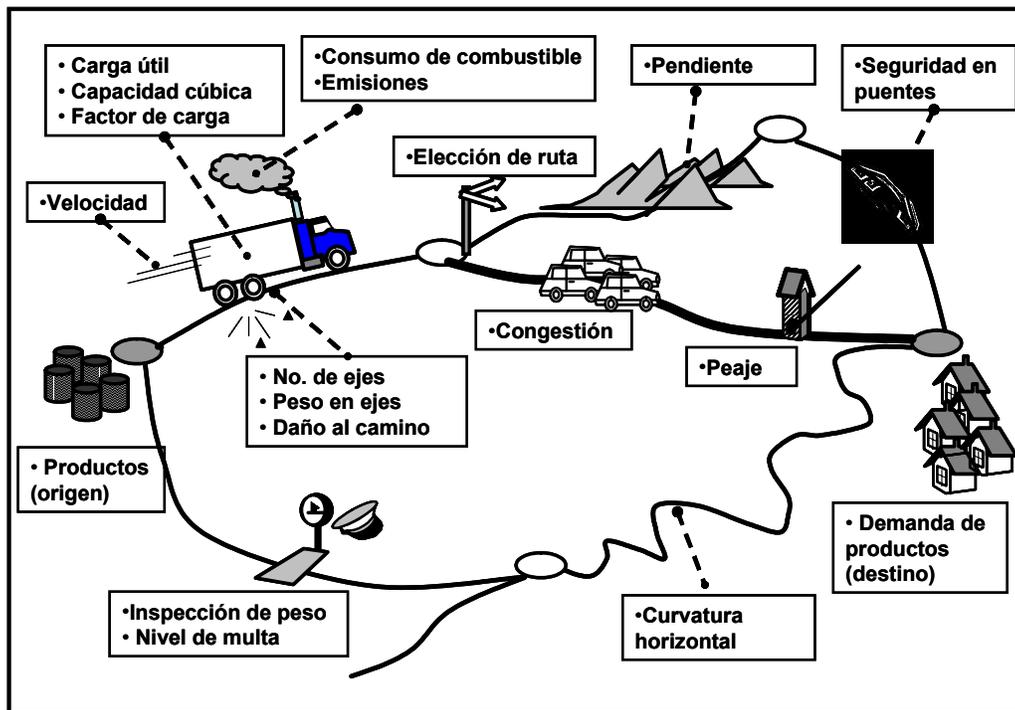


Figura 3.7 Una “imagen enriquecida” del sistema de transporte de carga

Estos elementos básicos entrelazados por la actividad del movimiento de carga describen un sistema con entradas, que son transformadas por medio de un proceso en salidas del sistema y que reflejan el punto de vista del responsable del camino. Un diagrama de bloques de esta representación del sistema de transporte de carga corresponde a la fig 3.9.

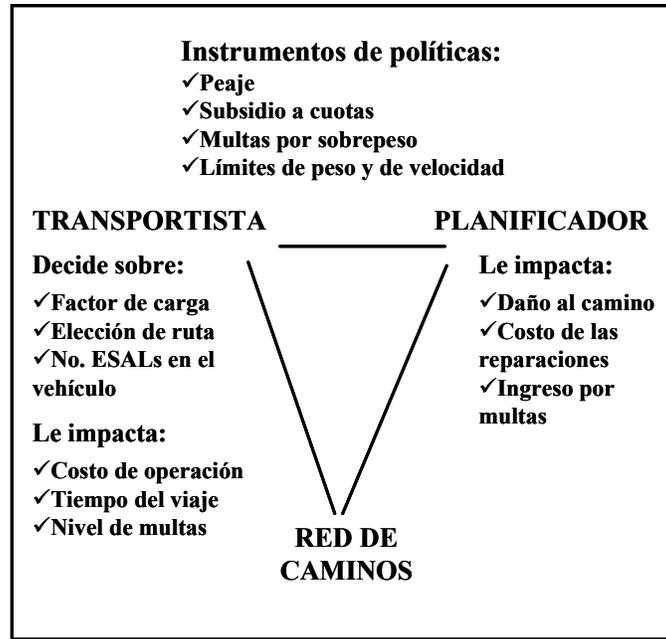


Figura 3.8. Principales elementos considerados en el autotransporte de carga.

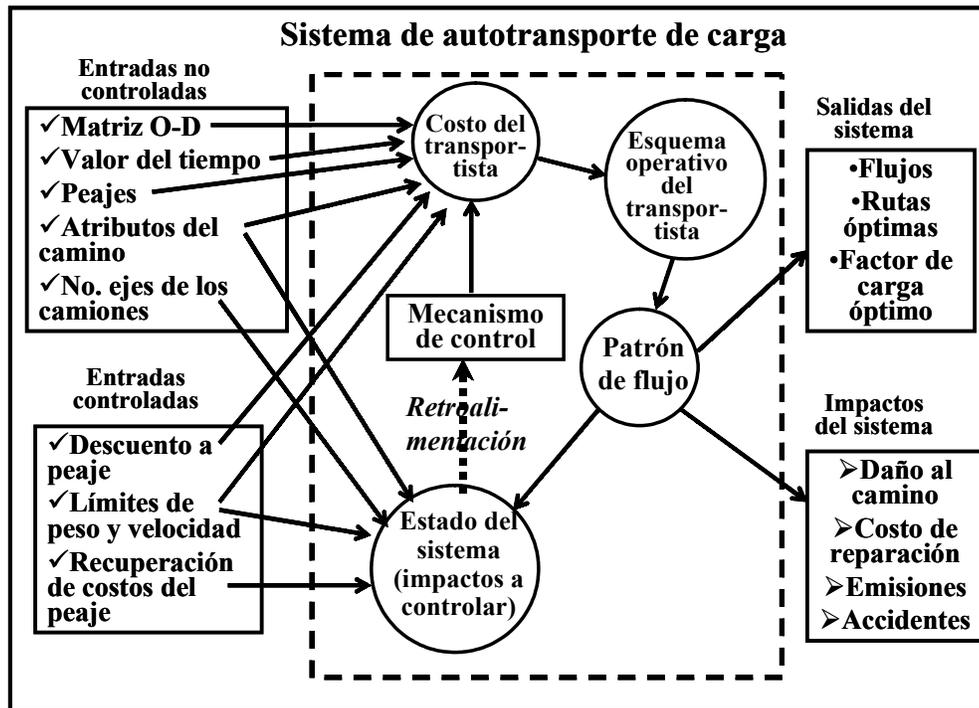


Figura 3.9. Un sistema para el autotransporte de carga

En este sistema, las decisiones del transportista se basan en sus costos de operación, que los lleva a elegir sus variables operativas para el desarrollo de su actividad de movimiento de cargas sobre la red carretera disponible. El

responsable del camino, a fin de controlar las actividades de los transportistas establece medidas de regulación, que puede modificar a fin de influenciar el comportamiento de éstos y así lograr un cierto desempeño del sistema de transporte.

El desempeño del sistema se evalúa por el *estado* del sistema, descrito por un conjunto de variables que miden los objetivos del planificador, tales como el ingreso por peaje, el daño al pavimento, los niveles de sobrepeso en los flujos carreteros, etc. El sistema genera tanto las salidas esperadas, por ejemplo intensidades de flujos vehiculares, o patrones de ruta, como impactos que son consecuencias no planeadas del proceso, como son el daño a la infraestructura, los accidentes o la contaminación ambiental.

Una entrada al sistema puede ser controlada o no-controlada. La primera es un parámetro para los transportistas, para el planificador o para ambos, y la última es una variable de decisión que puede modificar el planificador. La elección que haga el transportista de sus variables operativas, como es la selección de ruta o el factor de carga, que se basa en los costos de operación del vehículo, está influenciada tanto por las entradas al sistema como por el mecanismo de control impuesto por el planificador, y tiene un impacto en el estado del sistema. Es así que las decisiones de transportistas y del planificador se afectan mutuamente. El diagrama de la fig 3.10 ilustra esta interdependencia.

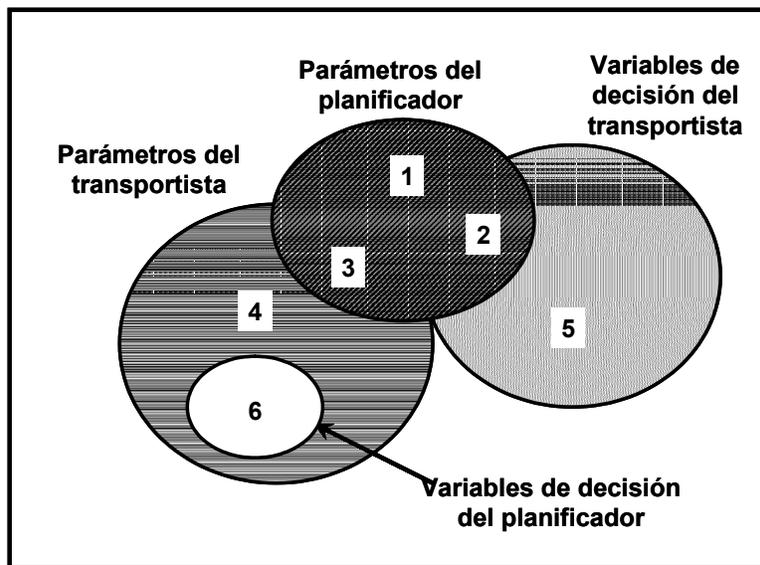


Figura 3.10. Interdependencia entre parámetros y variables

De esta manera, mientras que el máximo número de puntos de inspección de pesos en la red carretera es un parámetro que afecta exclusivamente al costo del planificador (indicado en el subconjunto 1 de la fig 3.10), el número de ejes del camión o el factor de carga utilizados son variables de decisión del transportista que al mismo tiempo representan parámetros para el cálculo de costo del

planificador (subconjunto 2 de la fig 3.10). Ambos actores comparten parámetros comunes, tales como la pendiente del camino o el valor del tiempo para las cargas movidas (subconjunto 3, fig 3.10). Algunos parámetros son únicos para los transportistas, como el total de toneladas-kilómetro demandadas o el costo de los movimientos vacíos (subconjunto 4, fig 3.10), y algunas variables de decisión son sólo de los transportistas, p ej los fletes cobrados o el nivel de servicio (subconjunto 5, fig 3.10). Finalmente, ya que el planificador tiene el objetivo de controlar las respuestas de los transportistas, las variables de decisión del responsable del camino son parámetros que afectan los cálculos de costo de operación para el transportista (subconjunto 6, fig 3.10)

En el ejemplo de la sobrecarga en los camiones, el factor de carga es un parámetro que el responsable del camino usa en sus cálculos de daño al pavimento, pero este factor es al mismo tiempo una variable de decisión que el transportista fija para minimizar sus costos. Análogamente, el nivel de la multa por tonelada en exceso señalada en la reglamentación, es un parámetro para estimar los costos de operación del transportista, pero al mismo tiempo es una variable de decisión del planificador en su proceso de minimizar los daños a la infraestructura.

Esta interdependencia entre parámetros y variables de decisión para transportistas y planificadores indica que las interacciones entre ellos ocurrirán de modo natural cuando estos actores desplieguen sus actividades buscando su propio desempeño óptimo, independientemente unos de otros. La herramienta de modelado adecuada deberá entonces adaptarse para manejar diferentes actores que simultáneamente persiguen diferentes objetivos, y aún más, objetivos contradictorios. Este enfoque es el que se trata en la siguiente sección.

3.3 Objetivos del transportista y objetivos del planificador: conflicto y coexistencia

Una vez que la influencia mutua de las decisiones de transportistas y planificadores se ha reconocido, el perfil emprendedor del responsable del camino, así como su capacidad legal para imponer reglamentaciones al autotransporte de carga facultan a este actor a tomar la iniciativa en la interacción. El planificador, al tomar iniciativas sustentadas en información adecuada, supuestamente conoce las posibles reacciones que tendrán los transportistas ante las diversas circunstancias y por tanto, podría anticiparse a ellas. De este modo el responsable del camino podría seleccionar entre sus variables de decisión aquella que induzca en los transportistas comportamientos en la dirección que favorezca sus objetivos de planeación.

Modelos que puedan manejar las interacciones entre actores que simultáneamente persiguen sus propios objetivos, los cuales pueden ser conflictivos, pero con la particularidad de que uno de los actores tiene un papel preponderante en la toma de iniciativas, parecen ser los más adecuados en la

tarea de modelación del transporte de carga aquí expuesta. Dos paradigmas que se ajustan a esta descripción son los siguientes:

- Teoría de juegos, donde los “jugadores” o participantes en el problema utilizan sus propias estrategias para lograr sus propios objetivos, y una tabla (matriz) de “ganancias” muestra los resultados que se obtienen para cada combinación de estrategias de los jugadores. Cada jugador busca la estrategia que optimice su ganancia. Este esquema es adecuado para modelar situaciones de conflicto o de competencia (Greenberg, 2001). Distintos supuestos tanto de la información disponible para cada jugador sobre las posibles estrategias de los demás jugadores, como de las posibilidades de cooperar o no con otros jugadores dan origen a variaciones en los tipos de juegos. Particularmente adaptable a problemas de planeación es el caso del *Juego de Stackelberg* (en memoria del economista alemán H.V. Stackelberg), donde uno de los jugadores (llamado “líder”) sabe de antemano las reacciones de los demás jugadores (llamados “seguidores”) a cualquiera de sus propias estrategias, en un juego donde todos los participantes tratan de optimizar sus ganancias (Fisk, 1984). En el problema del sobrepeso en el autotransporte de carga, el planificador tendría el papel del “líder”, mientras que los transportistas participarían como “seguidores”.
- Programación binivel, donde existe una estructura de programación matemática en la cual hay dos funciones objetivo; la primera, (llamada “del líder”) que en el problema del sobrepeso representa los propósitos del planificador del camino; y una segunda función objetivo (llamada “del seguidor”) que representa las respuestas de los transportistas, una vez que el líder ha tomado la iniciativa (Bell e lida, 1997). Al incluir las condiciones de optimalidad para los transportistas dentro de las restricciones del problema de optimización del líder se da a este último una alta prioridad en el proceso de optimización, sin obstaculizar las posibilidades de optimización para el seguidor en las interacciones.

Las siguientes observaciones aclaran un poco más las características de estos dos enfoques de modelación.

En el juego de Stackelberg, los roles tanto de líder como de seguidores están claramente reconocidos, así como la información de que dispone el líder sobre las posibles reacciones de los seguidores a las estrategias que aplique. Una cuestión clave en el juego de Stackelberg, sin embargo, es *quién inicia el juego*; este jugador se convertirá en el líder que arranca las interacciones, dejando el papel de seguidor a los demás jugadores. El siguiente ejemplo de un juego con dos participantes (Binmore, 1992, p. 292) ilustra cómo un juego de Stackelberg puede

llegar a distintos resultados, dependiendo del jugador que inicia las interacciones. La matriz de pagos para este juego es como sigue:

	T ₁	T ₂
S ₁	2 0	0 3
S ₂	1 2	3 1

donde las filas S_1 y S_2 representan las posibles acciones que puede tomar el jugador No. 1 para lograr la ganancia que está anotada en la esquina inferior izquierda de cada celda de la matriz; mientras que las columnas T_1 y T_2 son las correspondientes estrategias del jugador No. 2 para obtener la ganancia anotada en la esquina superior derecha de cada celda de la matriz. Si el jugador No. 1 inicia las interacciones, la solución del juego resulta ser la combinación de estrategias (S_2, T_2) , con lo que el jugador No. 1 (el líder) gana 1 y el jugador No. 2 (el seguidor) gana 3, pero si el juego se inicia por el jugador No. 2, la solución del juego de Stackelberg es (S_2, T_1) , que da al jugador No. 2 (el líder) una ganancia de 1, y al jugador No. 1 (el seguidor) una ganancia de 2.

La programación binivel es un caso particular de la programación multinivel, un enfoque de optimización en el que las variables de decisión pueden separarse en grupos (llamados “niveles”) que representan subsistemas independientes, o casi independientes en el problema original, con el fin de explotar algunos principios de descomposición que faciliten los algoritmos de solución (p ej cuando en un programa lineal la matriz de restricciones tiene una forma particularmente dócil de tratar) o cuando un subconjunto de variables (niveles) está obligado a ser la solución de un problema de optimización de un subproblema del planteamiento original (Greenberg, 2001). Las variables que participan en la función objetivo principal son llamadas “del nivel superior”, y representan las posibles acciones del líder que toma decisiones; mientras que el resto de las variables de decisión están en “el nivel inferior” y equivalen a las acciones que pueden tomar los seguidores del líder en las interacciones.

Debido a estas consideraciones, en este trabajo de modelación del problema del sobrepeso en el autotransporte de carga se ha preferido el enfoque de programación binivel, el cual se adapta bien para tratar el caso de dos actores con decisiones independientes pero interrelacionados; uno de los cuales tiene un papel dominante (el planificador del camino) no solamente para iniciar las acciones cuando se requiera, sino con facultades para imponer regulaciones en el sistema de transporte. Además, el enfoque de programación binivel permite obtener simultáneamente condiciones de optimalidad para ambos actores sin menoscabo de la posición jerárquica que los objetivos del planificador del camino tiene en la representación global de la problemática.

Se han desarrollado ejemplos típicos de programación binivel en el área de control de tráfico, donde el nivel superior representa al planificador que controla la red de caminos adoptando medidas administrativas y de rediseño de la red a fin de mejorar el desempeño de la misma; mientras que el nivel inferior representa al usuario de la infraestructura que decide sobre las rutas a usar, el reparto entre modos de transporte o los orígenes y destinos de sus movimientos, en respuesta a las decisiones tomadas por el planificador. Algunos ejemplos al respecto se han abordado para modelar el manejo óptimo de semáforos en redes urbanas, la optimización del uso de la capacidad en autopistas, o el diseño de peajes óptimos en autopistas (ver Yang & Bell, 2001, p.1).

En el campo de sistemas de transporte público, un caso es el trabajo de Hollander, Prashker y Mahalel (2003) en el que el nivel superior representa al planificador urbano, cuyo objetivo es maximizar simultáneamente el uso del transporte público, y el número de visitantes al centro de la ciudad por medio de una política de estacionamiento; en tanto que el nivel inferior representa la población de pasajeros, motivados a minimizar sus costos de transporte y que responden conforme a un modelo tipo logit de selección de modo para decidir tanto el destino de sus viajes como el uso del automóvil privado en lugar del transporte público.

Particularmente interesante es el trabajo de Ferrari (2002), que reporta un programa matemático de tres niveles para el diseño de cargos a usuarios del camino. El primer nivel corresponde a una agencia de gobierno que busca un diseño de peaje a fin de recuperar una parte de sus costos de mantenimiento carretero; el segundo nivel consiste de las comunidades que son afectadas en su medio ambiente debido al tráfico que resulta desviado por el esquema de peaje y que reclaman compensación, y el tercer nivel representa a los usuarios de las autopistas que eligen sus rutas en respuesta al esquema de peaje que esté funcionando.

En este trabajo, el papel de líder (nivel superior) lo tiene el responsable del camino, encargado de las tareas de reparación y mantenimiento de una red carretera en la cual ya opera un subsistema de caminos de cuota, y que tiene poca o ninguna influencia para cambiar las reglamentaciones generales tales como los máximos autorizados a pesos y dimensiones o los niveles vigentes de los peajes, aunque puede implantar controles de vigilancia e inspección en los caminos. El seguidor (nivel inferior) en esta interacción es el transportista que utiliza la red carretera con el propósito de reducir sus costos de operación mediante la selección de ruta, factor de carga o velocidad de tránsito.

Concretamente, en el problema del sobrepeso el planificador conociendo el mecanismo de deterioro del pavimento y sus costos asociados, así como las prácticas usuales de carga de los transportistas, implanta un esquema de vigilancia e inspección a fin de minimizar los costos derivados del daño al camino que resulta de los camiones con sobrepeso. Los transportistas, por otra parte, tratan de realizar el transporte utilizando el factor de carga que les minimice sus costos operativos, incluyendo la multa que podrían esperar en caso de que fuesen

detectados con sobrepeso. Este es el modelo que se mostrará en los capítulos siguientes.

4 Relaciones entre el sobrepeso, el daño al pavimento y la vigilancia

El autotransporte de carga, en un ambiente de competencia se guía naturalmente por criterios de eficiencia, buscando ya sea el máximo rendimiento de los recursos utilizados al producir el servicio, o el uso mínimo de insumos para generar un servicio determinado.

El criterio elemental de minimizar el costo por tonelada-kilómetro reduce el número de viajes y el costo de operación para el transportista, incrementando así su utilidad. Desde el punto de vista operacional, y suponiendo que las decisiones se toman racionalmente, un transportista naturalmente prefiere mover carga en carro completo a moverla al 50% de la carga útil, ya que así reduce el costo por t-km al prorratear los costos entre un mayor número de toneladas. Extrapolando esta conducta, el operador que decide mover carga a niveles superiores a la carga útil especificada legalmente, incurre en sobrecarga, pero reduce el costo por t-km aún más. De este modo, la sobrecarga resulta un incentivo económico para el transportista. Esta práctica, sin embargo, se ve restringida por la reglamentación de los pesos vehiculares permitidos, por la potencia disponible en el motor del vehículo y por las condiciones del camino, en particular la pendiente.

Desde el punto de vista del responsable del cuidado del camino, el sobrepeso en los camiones de carga genera serios impactos que se manifiestan por el deterioro acelerado del pavimento y el daño estructural a los puentes. La literatura sobre el tema ha reportado este comportamiento, así como los efectos resultantes, como es el caso de transportistas que consideran a las multas por sobrepeso como parte de los costos de operación, anulando así su efecto de disuasión (Euritt, 1987), o el caso de fallas en puentes norteamericanos durante el periodo de 1951 a 1988 (Harik et al, 1990), donde el sobrepeso de los camiones se registró como causa principal de colapso en 23 de un total de 92 casos (25%). El sobrepeso en camiones de carga es un problema que el responsable del camino tiene que enfrentar y controlar. Para ello requiere estimar la magnitud y los costos asociados al daño resultante, a fin de proponer medidas que reduzcan, o al menos compensen, este impacto negativo.

Este capítulo presenta un marco de análisis de interacción entre el operador del autotransporte de carga que lleva sobrecarga y el responsable del camino. El criterio para explicar el comportamiento de los operadores es la minimización de los costos de operación, mientras que el correspondiente criterio para las acciones del responsable del camino es la minimización de los costos de mantenimiento derivados del impacto de la sobrecarga en la red carretera. En la última parte del capítulo se propone un modelo simple para el control de camiones sobrecargados. Este modelo se utiliza en el siguiente capítulo en el desarrollo de un ejemplo numérico.

4.1 La interacción entre transportista y planificador

Adoptando un enfoque sistémico, el autotransporte de carga puede verse como un conjunto de elementos que interactúan entre sí para lograr un fin común; en este caso, el movimiento de carga en la red carretera. La interacción entre los transportistas desplazando camiones sobrecargados y el responsable del camino buscando medidas adecuadas para controlar esta práctica puede representarse con un diagrama de influencia (Daellenbach, 1994, pp. 67-71) también llamado diagrama causal (Abbas y Bell, 1994; Redd y Schneider, 1996), el cual ayuda a visualizar las interacciones e influencias entre las partes del sistema. La fig 4.1 muestra este diagrama, con los principales actores, entradas, salidas y procesos involucrados en la representación del problema del sobrepeso en el autotransporte de carga.

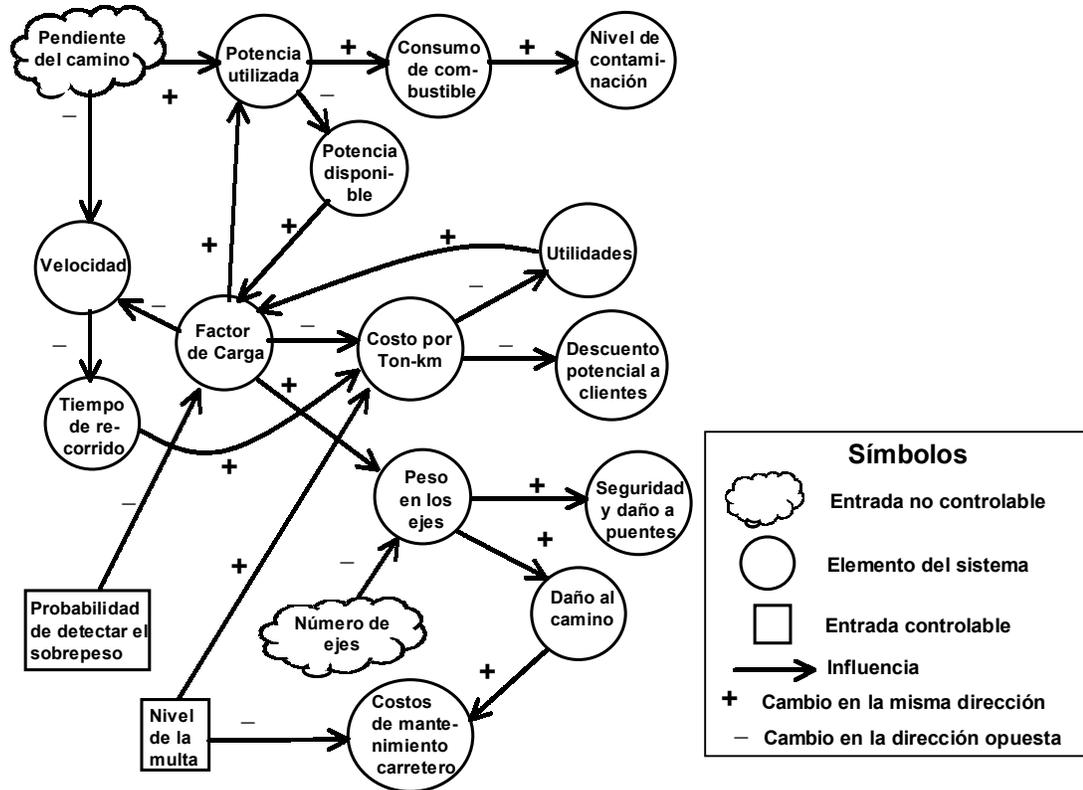


Figura 4.1. Diagrama de influencia para el problema de sobrepeso en camiones de carga

El diagrama de influencia es una técnica común en los modelos de dinámica de sistemas, donde la evolución de un sistema a lo largo del tiempo es el objeto de estudio. En este trabajo, el diagrama de influencia se aplica de una manera más simple, como un medio para revelar las interrelaciones entre las entradas al sistema de transporte y sus elementos, entre los propios elementos del sistema y entre los elementos del sistema y las salidas del mismo (Daellenbach, 1997).

En el diagrama, el icono de nube indica entradas de datos o entradas no controlables al sistema, el círculo indica variables o componentes del sistema; y los rectángulos entradas controlables del sistema. Las flechas señalan la dirección de la influencia; por ejemplo, al aumentar el sobrepeso en el camión, disminuye la velocidad del vehículo y aumenta el tiempo de recorrido, lo cual incrementa los costos de operación en los conceptos de costo que dependen del tiempo, como es el caso del pago del conductor y el auxiliar en su caso.

Los signos “+” y “-” sobre las flechas señalan la dirección de la influencia. Una influencia positiva (+) indica que causa y efecto cambian en el mismo sentido mientras que una influencia negativa (-) significa que causa y efecto varían en sentidos opuestos. Así, la fig 4.1 muestra que un aumento en la pendiente del camino incrementa el uso de la potencia del motor del camión si se quiere mantener determinada velocidad (influencia positiva), mientras que un aumento del *factor de carga* en el camión, es decir, el porcentaje usado de la carga útil, reduce la velocidad del mismo (influencia negativa). De esta manera, el diagrama de influencia ayuda a identificar las cadenas causa-efecto, a las que resulta pertinente analizar.

Desde el punto de vista del operador de transporte, la motivación para sobrecargar viene del prorrateo de los costos de operación entre un mayor número de toneladas. En la fig 4.1 esto se ilustra en la cadena: *aumento del sobrepeso en el camión → disminuye el costo promedio por t-km → aumenta la utilidad de la operación*. Adicionalmente, la reducción de costo por t-km podría pasarse a los cargadores o al cliente final, mejorando así la competitividad del transportista; esto puede verse en la cadena: *disminuye el costo promedio por t-km → aumenta el descuento potencial al cliente*.

Sin embargo, los operadores no pueden sobrecargar a cualquier nivel deseado. La pendiente del camino, naturalmente restringe la posibilidad de sobrecargar. La cadena: *aumento en la pendiente del camino → reducción en la velocidad del camión → aumento en el tiempo de recorrido*, ilustra esto.

Este último resultado, para cargas sensibles a demoras en la entrega como en el caso de productos perecederos o los insumos para la producción “justo a tiempo”, podría significar penalizaciones al transportista, lo que a su vez desmotivaría la práctica de sobrecargar. Para productos insensibles a demoras en el viaje, la sobrecarga podría manifestarse en velocidades de circulación muy bajas, lo que lleva a considerar la reglamentación de *una velocidad mínima de circulación*, cuya no observancia daría lugar a una multa. Aparte de la correlación que habría entre bajas velocidades de circulación y la ocurrencia de sobrepeso en un camión, una reglamentación de velocidad mínima en carreteras puede justificarse por la incidencia que este factor ha tenido en los accidentes por alcance.

En cuanto al aspecto de la energía, un camión con sobrepeso al requerir potencia extra del motor, aumenta su consumo de combustible, así como la generación de emisiones contaminantes. Esto puede notarse en la cadena: *aumenta el factor de*

carga → aumenta la potencia usada → aumenta el consumo de combustible → aumentan las emisiones contaminantes.

La cuestión de la contaminación, así como la problemática indicada en la cadena: *aumento en el peso de los ejes → aumento de los riesgos de accidentes y del daño estructural a puentes*, relativas a impactos ambientales y de seguridad, podrían desarrollarse más en este esquema de influencias, pero su consideración está fuera del alcance de este trabajo.

Una útil estructura que frecuentemente se encuentra en los diagramas de influencia es el ciclo de realimentación (Redd y Schneider, 1996), esto es, un ciclo cerrado de flechas de influencia que indican un efecto de realimentación, el cual podría ser de refuerzo o de atenuación dependiendo del efecto total de los signos “+” y “-” alrededor del ciclo. La fig 4.2 muestra algunos ciclos de realimentación encontrados en la fig 4.1.

Primero, el ciclo C1 sugiere que la sobrecarga está físicamente limitada por la potencia del motor, pues a medida que se mueven más toneladas, menos potencia queda disponible para el movimiento del vehículo. Sin considerar restricciones de los metros cúbicos disponibles en el camión, ni del nivel de tonelaje máximo tolerado por el vehículo sin que sufra daño estructural la suspensión o el chasis, el ciclo C1 resalta el papel que la potencia del motor tiene en la posibilidad de sobrecargar.

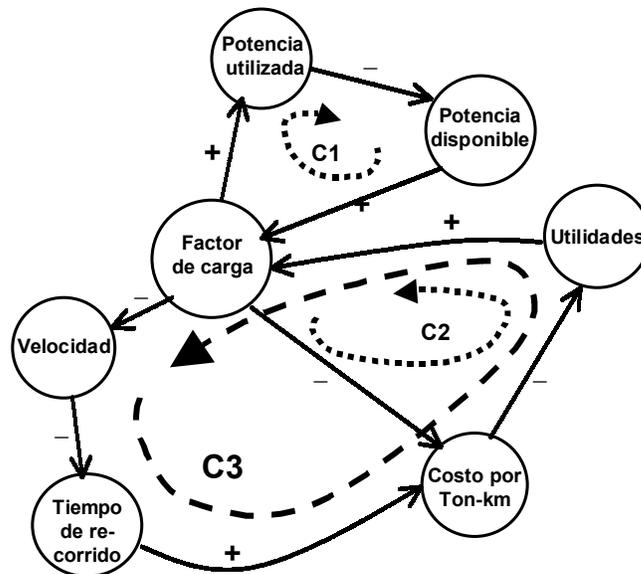


Figura 4.2. Algunos ciclos de realimentación en el problema del sobrepeso

Luego, el ciclo C2 muestra un ciclo de refuerzo que inicia con el incremento del factor de carga por el operador a fin de reducir el costo por t-km, el cual induce un incremento en la utilidad de la operación, lo cual a su vez estimula aún más la práctica de sobrecargar.

El tercer ciclo C3, sin embargo, es un ciclo atenuante que empieza con un incremento en la sobrecarga por el operador lo cual reduce la velocidad del vehículo, y consecuentemente incrementa el tiempo de recorrido; esto a su vez aumenta el costo por t-km por los gastos que aumentan con el tiempo (pago al conductor, mayor consumo de combustible, etc) y por tanto, reduce la utilidad de operación desalentando así mayores niveles de sobrepeso. El incremento en el tiempo de recorrido; como ya se ha comentado, puede tener un impacto importante en el movimiento de algunas cargas, por ejemplo, en el caso de productos perecederos, transporte refrigerado o insumos en los sistemas de producción “justo a tiempo”.

Desde el punto de vista del responsable del camino, el incremento tanto en el peso bruto vehicular como en el de los ejes del camión es la esencia del problema. Para desalentar el sobrepeso en transporte carretero de carga, la eficacia de la reglamentación de los pesos máximos permitidos en los camiones es función, entre otros, de los niveles de multa aplicables y de la probabilidad de detectar a los transgresores. Las acciones del responsable del camino que atenúen la ocurrencia del sobrepeso, que incrementen la probabilidad de detectar a los camiones sobrecargados o que eleven el nivel de las sanciones aplicables, ayudarán a reducir los impactos negativos de la práctica de sobrecargar.

De este modo, algunas estrategias como: la promoción del uso de vehículos con más ejes a fin de distribuir mejor el peso total de la carga, esquemas de sanciones de gran severidad o la mejora de las probabilidades de detección de camiones sobrecargados por medio de encuestas de pesaje o sistemas de pesaje en movimiento (Weigh-In-Motion o WIM systems) pueden ser medidas relativamente sencillas de difundir o promover para empezar a reducir los impactos negativos de la práctica de sobrecargar.

Haciendo un resumen de las observaciones del diagrama de influencia, no es difícil ver que, para que el sobrepeso se presente en el transporte carretero de carga, tres condiciones básicas son necesarias:

- ✓ La sobrecarga debe ser físicamente factible. Esta observación lleva a analizar la influencia que el tipo de carga, la potencia disponible en el motor y las características del camino tienen en la ocurrencia del sobrepeso.
- ✓ Los costos resultantes para el operador del transporte tienen que ser un incentivo económico para el mismo. Esta observación lleva a analizar los beneficios del sobrepeso en las operaciones del transportista, así como los límites en los cuales resulta conveniente llevar sobrecarga.
- ✓ Los esquemas de vigilancia del cumplimiento de la reglamentación vigente no pueden ser inviolables, ya que siempre dejan alguna oportunidad que permita la transgresión. Esta observación no es una crítica a los sistemas de vigilancia establecidos; más bien sugiere analizar los elementos

disponibles para controlar el sobrepeso en el transporte carretero de carga, así como sus alcances y limitaciones.

El carácter elemental de estas condiciones ayuda a orientar la discusión sobre el problema, señalando líneas de trabajo e investigación que llevan a proponer medidas concretas para controlar o al menos atenuar los impactos de la sobrecarga en camiones de carga.

4.2 Los factores físicos: la carga, el vehículo y el camino

En esta sección se analizan las posibilidades físicas de la práctica del sobrepeso, explorando la influencia de factores físicos tales como el tipo de carga movida, la potencia del motor, y las características del camino en la ocurrencia del sobrepeso en camiones de carga.

La cuestión de la densidad de la carga

La carga es el elemento más básico en el problema del sobrepeso. Dado que los camiones tienen capacidad tanto en tonelaje como en volumen, la densidad de la carga surge naturalmente como un factor que influye en la práctica de sobrepeso. La tabla 4.1 muestra los tonelajes y volúmenes característicos de los cinco tipos principales de camiones de carga identificados en el estudio de pesos y dimensiones organizado anualmente por el IMT (datos de 2001), así como la *densidad promedio de la carga que llena el volumen total disponible*, y la tabla 4.2 una breve lista de densidades de cargas líquidas y sólidas.

Tabla 4.1. Capacidades de peso y volumen de los cinco tipos principales de camiones de carga (Arroyo y Aguerrebere, 2002)

Tipo	Volumen (m3)	Tara * (t)	Carga útil en ficha técnica (t)	PBV carro entero (t)	Máx. PBV reglamento‡ (t)	Densidad promedio (t/m3)
C2	32,8	6,1	9,8	15,9	17,5	0,298
C3	34,4	8,8	17,3	26,1	26,0	0,503
T3-S2	66,2	17,4	25,0	42,4	44,0	0,378
T3-S3	66,2	19,4	35,1	54,5	48,5	0,530
T3-S2-R4	132,4	29,4	48,0	77,4	66,5	0,363
* Tara: peso del vehículo vacío						
‡ Referencia						

La densidad promedio en la tabla 4.1, calculada dividiendo el máximo tonelaje que el vehículo puede mover entre su capacidad en volumen, es la *densidad crítica* de un embarque que llena el volumen total disponible en el camión (omitiendo detalles de embalaje). Los movimientos de carga a granel que llenen la capacidad cúbica del camión y que tengan densidades mayores a esta densidad crítica producirán sobrepeso. En el caso de productos con embalaje, el volumen implícito en el empaque reduce la densidad total del embarque, disminuyendo el efecto de sobrepeso.

Tabla 4.2. Densidades para algunos tipos de carga (Slmetric, 2004)

Carga Líquida (25 ° C)	Densidad (t/m ³)	Carga Sólida	Densidad (t/m ³)
Iodo	4,93	Mercurio	13,55
Bromo	3,12	Plomo	11,34
Ácido cítrico	1,66	Cobre	8,93
Tetracloruro de carbono	1,58	Hierro	7,85
Cloro	1,56	Mineral de hierro	5,10
Flúor refrigerante R-12	1,31	Azufre, sólido	2,00
Agua	1,00	Sal, fina	1,20
Crudo mexicano (16°C)	0,97	Granos-maíz	0,76
Alcohol etílico (20° C)	0,79	Café en grano	0,56
Butano	0,60	Granos para fermento	0,43
Oxígeno (líquido)	0,19	Alfalfa molida	0,26
Éter	0,07	Carbón	0,21

Así por ejemplo, un embarque de alfalfa (densidad 0,26) que llene la capacidad cúbica de un camión tipo C2 da una carga de 8,53 t (factor de carga = 0,87), mientras que un embarque semejante de café en grano (densidad 0,56) representa una carga de 18,4 t (factor de carga 1,88), que excede en 88% el peso máximo permitido en este tipo de vehículo. En contraste, si el embarque de alfalfa es del tonelaje máximo permitido en el camión C2 (9,776 t), resulta un volumen de 37,6 m³, que excede por 15% la capacidad cúbica del camión, con lo probablemente el embarque rebasaría la altura de la caja del vehículo, implicando un exceso de dimensiones. La fig 4.3 muestra el factor de carga resultante para los cinco tipos principales de camión de carga en México a medida que la densidad de un embarque que ocupa toda la capacidad cúbica, aumenta.

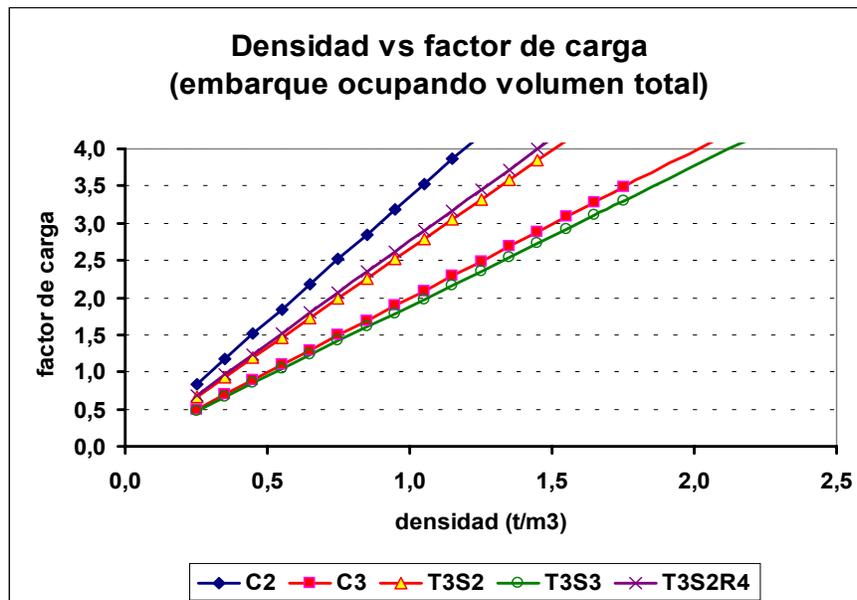


Figura 4.3. Factor de carga vs densidad para embarques ocupando la capacidad cúbica total en los cinco principales tipos de camión.

Las tablas y figura previas revelan que hay diversidad de cargas, lo bastante densas como para subir el factor de carga a niveles significativamente mayores que el permitido legalmente (o sea, factor de carga = 1,0) sin que se presenten restricciones de volumen disponible en el vehículo. Esta observación sugiere que muchos camiones moviendo carga dentro de los límites legales vigentes tienen un exceso de volumen que no utilizan, de modo que en el caso de cargas específicas (por ejemplo, granos, cemento, madera, arena, grava), el rediseño del vehículo podría ser pertinente, quizá acortando la altura de la caja del camión, ya que esto además reduciría la resistencia al movimiento mejorando de paso el consumo de combustible.

El vehículo y el camino

Una vez cargado un camión, el transporte depende de la capacidad del motor para mover esa carga considerando las características del camino, en especial la pendiente. La potencia del motor debe vencer tres fuerzas básicas: la resistencia al rodamiento, F_r ; la resistencia por la pendiente, F_g ; y la resistencia al movimiento por la fricción con el aire, F_d . La fig 4.4 ilustra estas fuerzas actuando sobre un vehículo en el camino.

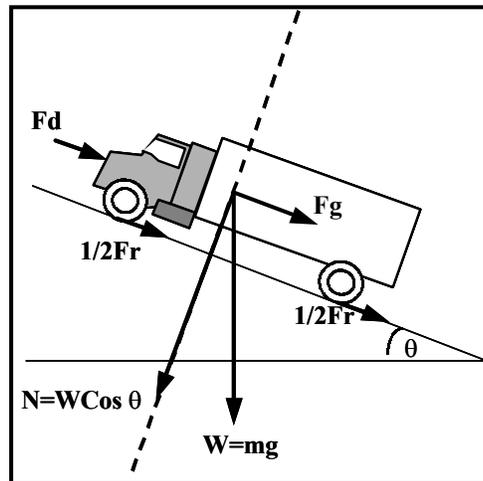


Figura 4.4. Resistencia al movimiento vehicular (basado en Bosch, 2000)

El peso del vehículo, denotado por W , se descompone en la fuerza F_g representando el efecto de la pendiente, y en la fuerza F_r que corresponde a la resistencia por fricción de las llantas con el pavimento. La fuerza F_d representa la resistencia de fricción del aire al movimiento. Las fórmulas que especifican estas fuerzas son (Bosch, 2000):

$$F_r = rmg\cos\theta \quad \dots[4.1]$$

$$F_g = mg\sin\theta \quad \dots[4.2]$$

$$F_d = 0.0386\rho C_d A(v + v_0)^2 \quad \dots \quad \dots[4.3]$$

donde r representa el coeficiente de resistencia al rodamiento; m es la masa del vehículo en kilogramos (coincide con el peso bruto vehicular); θ el ángulo que determina la pendiente; g la aceleración gravitacional ($9,81 \text{ m/s}^2$); ρ la densidad del aire en kg/m^3 ; C_d es el coeficiente aerodinámico de arrastre; A el área frontal proyectada del vehículo; mientras que V y V_0 son las velocidades del vehículo y del viento en contra, respectivamente, en km/h .

La resistencia total que el motor del vehículo debe vencer es: $F_T = F_r + F_g + F_d$; y para mantener al camión a una velocidad de $V \text{ km/h}$, la potencia P necesaria (en kW) resulta ser: $P = F_T V / 3600$ (Bosch, 2000, p. 338), es decir:

$$P = \frac{[rmg\cos\theta + mg\sin\theta + 0.0386\rho C_d A(V + V_0)^2]V}{3600} \quad \dots[4.4]$$

Como ilustración, con datos de dos de los vehículos muestra disponibles en el software HDM-VOC v 4.0 para calcular costos de operación vehicular (Archondo y Faiz, 1994, p.63): el camión rígido de 16 t de PBV (peso bruto vehicular) y el camión articulado de 45 t de PBV, se usó la ecuación 4.4 para estimar la potencia disponible en operación en estos vehículos, suponiendo una velocidad de 60 km/h para tres valores distintos de pendiente. La fig 4.5 muestra la variación en la potencia disponible para el camión rígido; y la fig 4.6 muestra el caso correspondiente al camión articulado.

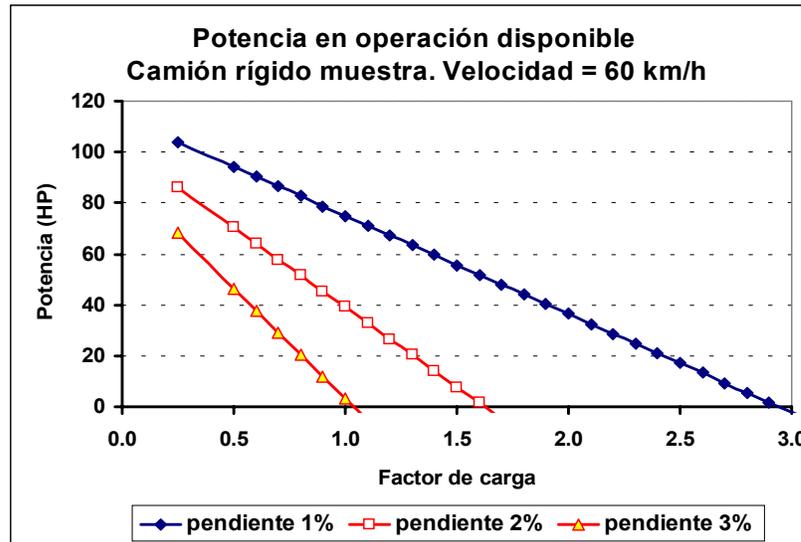


Figura 4.5. Potencia en operación disponible, camión rígido 16 t de PBV

Ambas figuras (4.5 y 4.6) hacen evidente el efecto de la pendiente en la reducción de la potencia disponible a medida que el factor de carga usado en el camión aumenta. La velocidad de 60 km/h es un valor típico en el movimiento carretero de carga; a mayores velocidades, la caída en la potencia disponible aumenta mucho más, lo que obliga a reducir los factores de carga en el camión para continuar con el movimiento.

Tocante a la influencia del camino en la práctica de sobrecargar, la pendiente es la característica más importante que restringe el movimiento. En la literatura inglesa, el término *gradability* (o *gradeability*, en el inglés norteamericano) describe la capacidad de un vehículo para subir en un camino con pendiente y se define como la máxima pendiente que el vehículo puede superar a una velocidad dada (Wong, 1978); este término se ha traducido al español como la *capacidad de ascenso de un vehículo* (M. Rafael y A. Zavala, 1999, p. 54). La fig 4.7 muestra valores de capacidad de ascenso obtenidos de la ecuación 4.4 para los vehículos muestra referidos, suponiendo cargas en carro completo a una velocidad de 60 km/h.

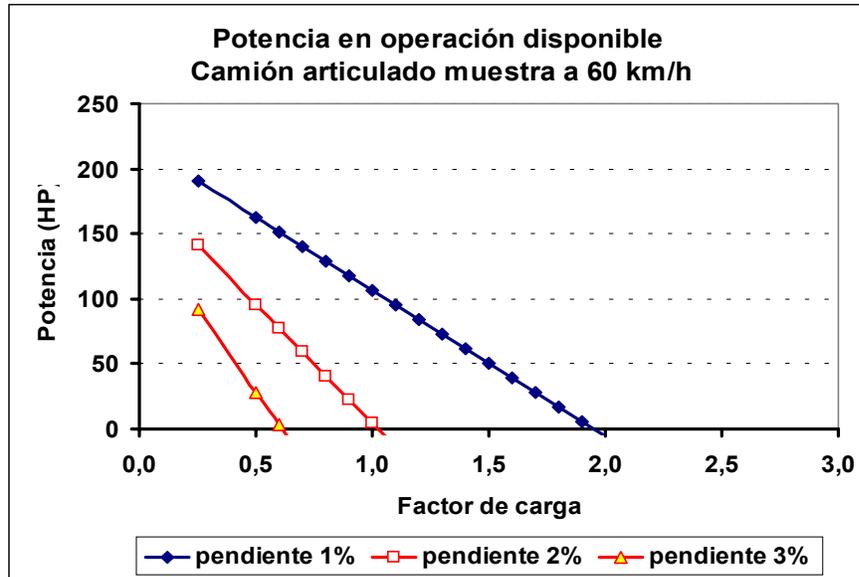


Figura 4.6. Potencia en operación disponible, camión 45 tons. PBV.

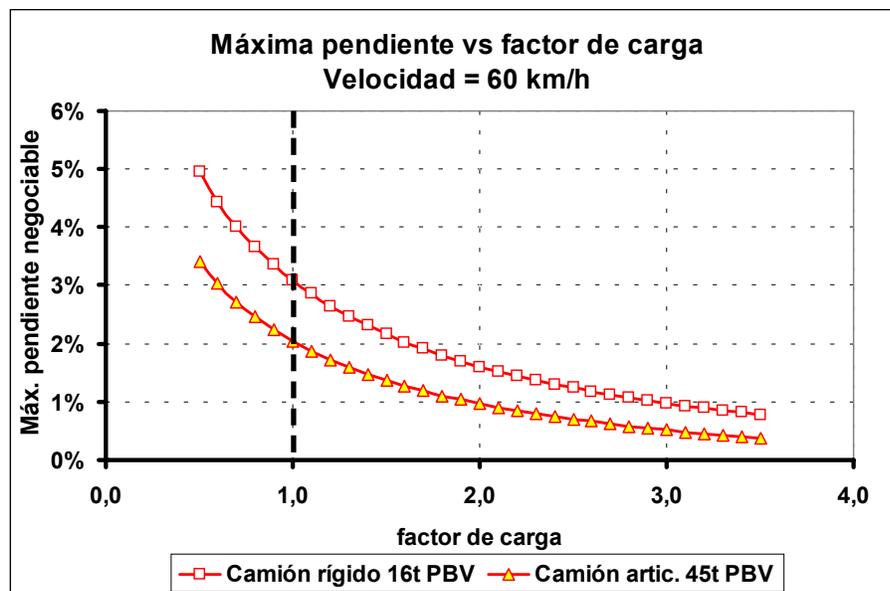


Figura 4.7. Máxima pendiente a 60 km/h. Camiones muestra, rígido y articulado

Las curvas de la fig 4.7 ilustran la influencia del factor de carga en la capacidad de un camión para ascender en un camino con pendiente a una velocidad dada: por ejemplo, para movimientos de carro entero, el camión rígido puede superar una pendiente del 3% a 60 km/h, mientras que el camión articulado, sólo podrá vencer una pendiente del 2% a la misma velocidad.

Bajo la clasificación del tipo de terreno como “plano” para pendientes de hasta un 3%, “lomerío” para pendientes entre un 3 y un 6%; y “montañoso” para pendientes mayores al 6% (según Lamm et al, 1999); la fig 4.7 indica que el sobrepeso en los dos vehículos muestra, suponiendo una velocidad de 60 km/h, no será posible en terrenos de lomerío o montañosos, siendo practicable únicamente en terrenos planos. Estas limitaciones se pueden resolver con una velocidad menor cuando el terreno no es plano; pero esto alarga el tiempo de viaje, lo que implica un aumento en los costos de operación.

Un factor adicional que limita el movimiento de los camiones es la curvatura horizontal del camino. Esta característica se define como el promedio ponderado de las curvaturas de las secciones curvas a lo largo del camino, con los pesos de ponderación proporcionales a la longitud de la sección (Archondo y Faiz, 1994, pp. 58-62). La curvatura horizontal se mide en grados/km, así un valor de 0°/km indica un camino perfectamente recto, mientras que un valor de 700°/km denota un camino con muchas curvas. La relevancia de la curvatura horizontal está en el hecho de que en caminos de alta curvatura, la propensión de las llantas a patinarse limita la velocidad que puede mantener el camión (Archondo y Faiz, 1994, p.37). Por ejemplo, la fig 4.8 muestra los cambios de velocidad para los vehículos muestra ya citados, calculados con el paquete HDM-VOC v 4.0 para un camino de pendiente cero.

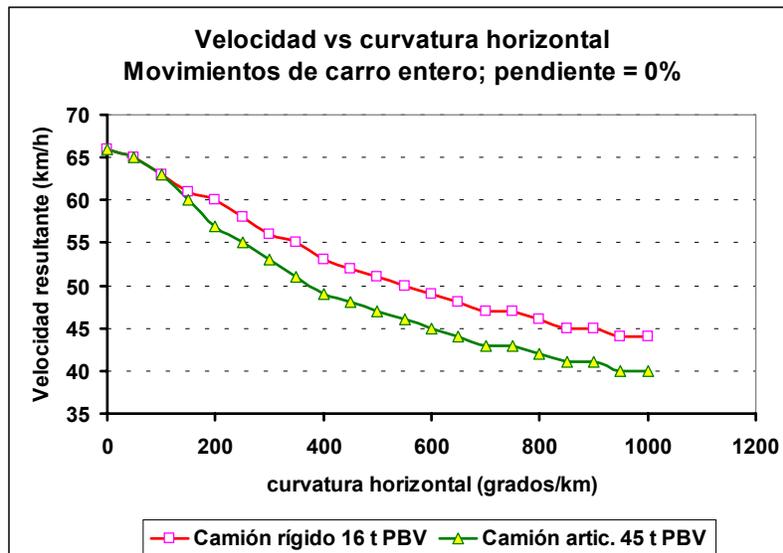


Figura 4.8. Efecto de la curvatura horizontal en la velocidad. Camiones muestra, rígido y articulado.

Con respecto al sobrepeso en los camiones de carga, el efecto de la curvatura horizontal se intensifica a medida que la masa del vehículo aumenta, debido a la fuerza centrífuga involucrada en el movimiento sobre las secciones curvas, resultando así en otra limitación a la práctica de sobrecargar, lo que obliga a reducir la velocidad aún más al circular en caminos de curvatura considerable.

4.3 Los factores económicos: el costo y el desempeño del autotransporte de carga

Los operadores de carga constantemente deciden el factor de carga a utilizar. Mover tanta carga como se pueda en un camión, mejora la productividad debido al menor número de viajes requeridos, y al prorratio de los costos entre un número mayor de toneladas. Los operadores en el servicio público federal, a su vez incrementan utilidades.

La tabla 4.3 muestra una estimación hecha por Paxson y Glickert (1982) de los costos de operación de un típico camión de carga interurbano norteamericano entre 1979 y 1980, donde se ve el lento incremento en el costo por milla, así como la rápida reducción en el costo por tonelada-milla, a medida que aumenta la carga movida.

Tabla 4.3. Costos de operación. Típico camión de carga norteamericano (Paxson y Glickert, 1982)

Carga útil (toneladas)	(A) \$ por milla	% cambio (A)	(B) \$ por tonelada-milla	% cambio (B)
10	0,891	---	0,089	---
15	0,895	0,4%	0,060	-32,6%
20	0,903	0,9%	0,045	-25,0%
25	0,905	0,2%	0,036	-20,0%

La tendencia decreciente del costo por tonelada-milla aumenta las utilidades del operador mientras más carga es movida. La fig 4.9 muestra este efecto, basado en las estimaciones de Euritt (1987) sobre las proporciones entre costos de operación y flete en un camión de carga tipo 3S-2 (tractor de tres ejes, y trailer de dos ejes), de uso común en Texas al mover cargas cada vez mayores en un viaje de 500 millas con una tarifa de \$US 0.056/lb.

Los costos de operación vehicular pueden estimarse razonablemente con el software HDM-VOC v 4.0 del Banco Mundial (Archondo y Faiz, 1994, pp. 15-16). El HDM-VOC v 4.0 estima costos de operación una vez que los datos de precios del vehículo nuevo, pagos a tripulación, costos unitarios de mantenimiento, etc, se ingresan junto con los principales parámetros del camino, tales como valores promedio de rugosidad, pendiente y curvatura horizontal. Adicionalmente, se tiene análisis de sensibilidad de algunos de los parámetros utilizados. El paquete

incluye una pequeña muestra de vehículos de carga para corridas de ensayo. La tabla 4.4 resume sus principales características.

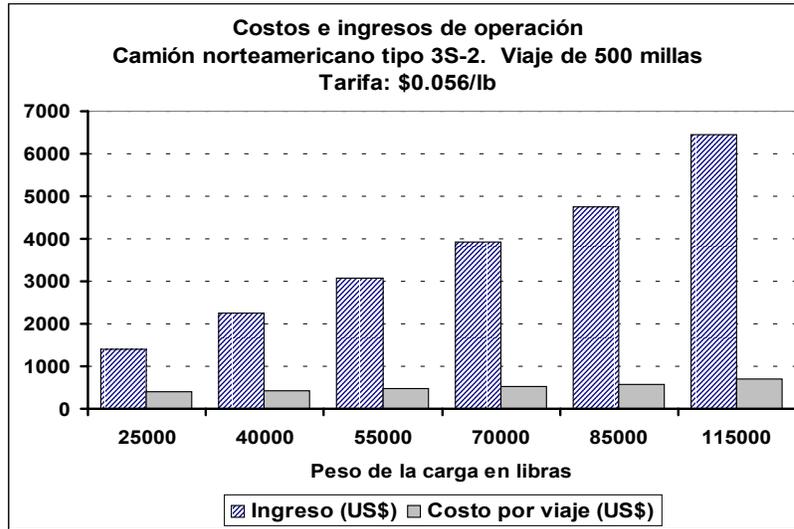


Figura 4.9. Costos e ingresos de operación. Vehículo norteamericano tipo 3S-2 (basado en Euritt, 1987)

Tabla 4.4. Camiones muestra del HDM-VOC v 4.0 (Archondo y Faiz, 1994)

Vehículo muestra	PBV (tons)	Carga útil (tons)	No. de ejes	Vehículo representativo
Camión mediano	16	11	2	Mercedes Benz 113
Camión pesado	22	16	3	Mercedes Benz 113
Camión articulado	45	32	5	Scania 110/39

La fig 4.10 ejemplifica costos de operación vehicular (COV) para los camiones muestra, graficando el *costo unitario por cada 1000 veh-km* (la salida estándar del HDM-VOC) contra el factor de carga modelado en el camión. Este ejemplo supone un camino de baja rugosidad (IRI = 2.5m/km) con pendiente de 3%. Las curvas de costo crecientes indican un mayor consumo de recursos a medida que se eleva el factor de carga en los camiones.

La fig 4.11 muestra las correspondientes *curvas de COV por t-km* contra el factor de carga, donde se aprecia cómo la mejora lograda al evitar cargas de menos de carro entero (factor de carga < 1.0) en favor de cargas de carro entero (factor de carga = 1.0) aumenta aún más rebasando el tonelaje de carro entero (factor de carga > 1.0), siempre que las condiciones del camino lo permitan.

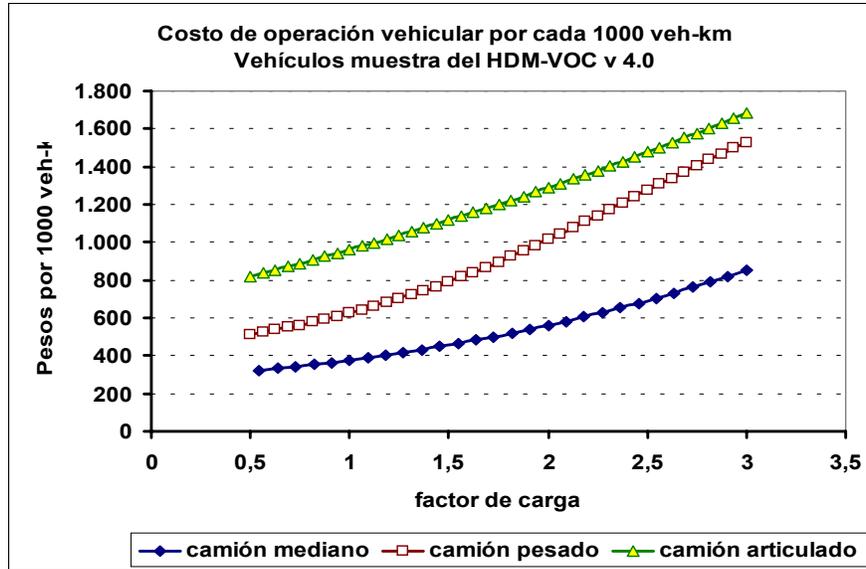


Figura 4.10. COV por 1000 veh-km, camiones muestra del HDM-VOC v 4.0

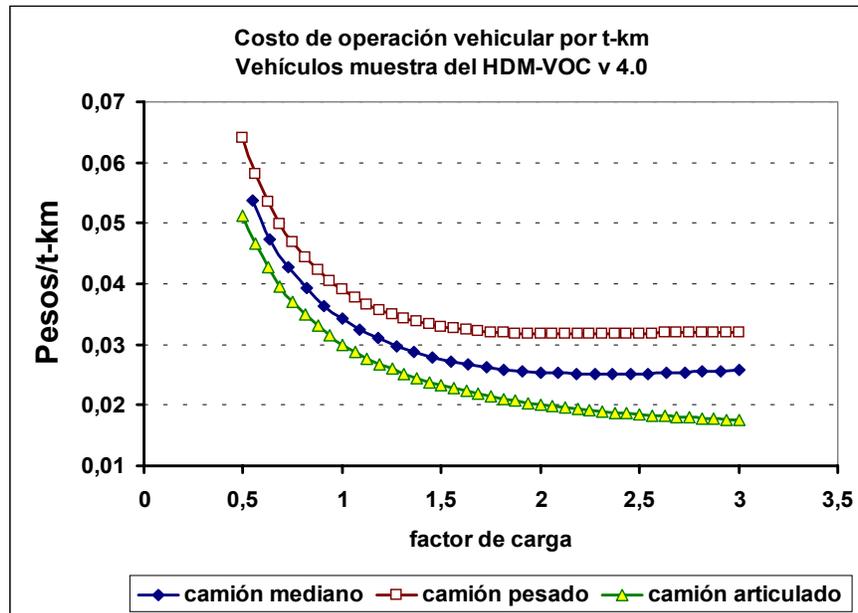


Figura 4.11. COV por Tkm, camiones muestra del HDM-VOC v 4.0

Los costos de mantenimiento del camino que origina el sobrepeso en los camiones, sin embargo, distan mucho de ser equitativos o leves.

El ejemplo de la tabla 4.5, permite comparar los incentivos económicos para los transportistas y el daño resultante al pavimento, estimados con el esquema de multas vigente a principios de los años 90 en Washington, USA (Casavant y Lenzi, 1993).

Tabla 4.5. Comparación entre el incentivo económico al sobrepeso y el costo de daño al pavimento resultante (Casavant y Lenzi, 1993)

Efectos económicos del sobrepeso. Dólares (US) por viaje

Dist. en millas		Libras de sobrepeso por viaje			
		3,000	5,000	10,000	30,000
30	Incentivo económico	2.20	3.60	7.30	21.80
	Daño al pavimento	2.50	4.40	11.20	74.40
100	Incentivo económico	7.30	12.10	24.20	72.60
	Daño al pavimento	8.30	14.60	37.20	248.00
300	Incentivo económico	21.80	36.30	72.60	217.80
	Daño al pavimento	24.80	43.90	111.60	744.10

Los resultados mostrados, así como la evidencia aportada en las corridas de prueba del HDM-VOC v4.0 indican como muy probable que los operadores vean un incentivo económico al usar factores de carga mayores a 1,0 en sus camiones, es decir, sobrepeso. Suponiendo que los operadores no imponen daño estructural a sus camiones, la siguiente consideración en la decisión de sobrecargar son las medidas de control y de vigilancia que el planificador del camino efectúa para controlar esta práctica ilegal.

4.4 La dificultad de hacer cumplir los reglamentos

Hacer valer los reglamentos de pesos vehiculares vigentes es tarea común de los planificadores de caminos en todo el mundo. La literatura acerca del sobrepeso en camiones de carga ha señalado con frecuencia la incapacidad de los esquemas de vigilancia en uso para manejar el problema. Por ejemplo, Walton y Yu (1983) en un estudio de caso en Texas (USA) estimaron, para un periodo de 20 años al inicio de su estudio, que los costos extras para el estado resultantes de las prácticas de sobrecargar camiones, serían de cerca de US\$ 261 millones; mientras que la recaudación de multas del esquema de vigilancia en uso sería tan sólo de \$US 84 millones. Aparentemente, muchos operadores consideran las multas como un gasto de operación más, debido al bajo nivel de *la multa promedio*. Paxson y Glickert (1982) reportan el efecto de las estructuras de multas por sobrepeso en tres estados norteamericanos al inicio de los años 80, tal como se ve en la tabla 4.6, donde la débil coerción al cumplimiento es evidente.

Tabla 4.6. Efecto de las multas en incentivo al sobrepeso en tres estados norteamericanos (Basado en Paxson y Glickert, 1982)

Estado	Máximo peso permitido (lb)	Carga útil (lb)	Utilidad esperada (US\$)	Multa esperada (US\$)	Incentivo neto a sobrecargar (US\$)
Tennessee	73,280	80,000	245	3	242
Indiana	73,280	80,000	325	134	191
Iowa	80,000	90,000	425	180	245

De modo similar, Euritt (1987), al examinar estructuras de multas en algunos estados norteamericanos, halló distintos valores *del efecto neto de la multa* sobre los incentivos económicos al sobrepeso. Esto se ilustra para tres estados: Arkansas, Louisiana y Nuevo México en la tabla 4.7, que muestra cómo el efecto de las multas sobre el incentivo logrado con la sobrecarga disminuye a medida que se mueve más carga, llegando a valores en los que el resultado neto es más bien un estímulo que un freno a la práctica de sobrepeso.

En este ejemplo, en virtud de las distintas estructuras de multas en dichos estados, el nivel de sobrepeso que genera un resultado neto positivo, una vez contabilizada la multa esperada se da en diferentes niveles de carga. Así, en Arkansas las multas resultaron efectivas hasta el nivel de las 110.000 libras de PBV; en la Louisiana resultaron efectivas en el rango de 95.000 a 110.000 libras de PBV; y en Nuevo México la multas sencillamente no resultaron efectivas.

Tabla 4.7. Valor neto del incentivo económico después de multas en tres estados norteamericanos (basado en Euritt, 1987)

PBV (lb)	Incentivo incremental (US\$)	Multa potencial (US\$)	Incentivo incremental neto (US\$)
Arkansas			
80,000	0	0	0
85,000	265	350	-85
90,000	529	600	-71
95,000	793	850	-57
100,000	1056	1100	-44
110,000	1580	1600	-20
130,000	2621	2600	21
Louisiana			
80,000	0	0	0
85,000	265	150	115
90,000	529	400	129
95,000	793	850	-57
100,000	1056	1100	-44
110,000	1580	1600	-20
130,000	2621	2600	21
Nuevo México			
80,000	0	0	0
85,000	265	75	190
90,000	529	425	104
95,000	793	500	293
100,000	1056	500	556
110,000	1580	500	1080
130,000	2621	500	2121

Estos resultados sugieren que la eficacia de un esquema de multas depende de su capacidad de aumentar a la par con el incentivo económico de la sobrecarga, y que las estimaciones conservadoras de los niveles de multas podrían anular la disuasión, como en el caso de Nuevo México en la tabla 4.7. Las Tablas 4.6 y 4.7

suponen implícitamente que los operadores con sobrepeso, siempre son detenidos; un hecho que en la práctica difícilmente se cumple, lo que realza la importancia que tiene la probabilidad de detener a los transgresores en el tema de la exigencia al cumplimiento de los reglamentos.

Dos parámetros básicos sustentan la eficacia de un esquema de vigilancia de la reglamentación: a) la capacidad de inspección; y b) el nivel de las multas. El primero determina la *probabilidad* de detener a los transgresores, la cual al multiplicarse por la segunda, da la *multa esperada* que en promedio pagará el operador con sobrepeso.

La probabilidad de detener a los operadores sobrecargados varía de lugar a lugar, dependiendo de la extensión de la red de caminos y de los recursos disponibles para vigilancia. Así, mientras que Paxson y Glickert (1982) basados en entrevistas con policías norteamericanos estimaron probabilidades de detención de un transgresor en 5, 20 y 15% para los estados de Tennessee, Indiana e Iowa, respectivamente; en el estudio de Euritt (1987) Texas tiene una baja probabilidad de detección de camiones sobrecargados debido al considerable millaje que hay que patrullar. En el caso texano, con una revisión de vehículos *en promedio cada 12.500 millas*, las probabilidades de detener transgresores para un viaje de 100, 500 y 1,100 millas resultaron de 0,8, 4 y 8,8% respectivamente; además, ocurre que no todos los vehículos detenidos para revisión son realmente pasados a la báscula, lo que reduce aún más la eficacia del sistema de observancia del reglamento (Euritt, 1987).

La inspección se hace tanto en estaciones fijas de pesaje como con equipo móvil y tecnología de pesaje en movimiento (weigh-in-motion, WIM, en la literatura inglesa). Las fijas manejan volúmenes vehiculares mucho mayores y dan pesaje preciso con básculas estáticas, pero carecen de la versatilidad del equipo móvil y son bastante más caras. Los equipos móviles son más económicos y se adaptan fácilmente a una diversidad de terrenos, pero tienen menos precisión y algunas veces generan falsas alarmas, llevando a inspecciones en las que realmente no hay sobrepeso. La tabla 4.8 muestra algunos factores considerados por el Departamento de Transporte norteamericano (US DOT) para evaluar estrategias de vigilancia e inspección (US DOT, 2000), donde se indican las ventajas y desventajas de cada estrategia.

Las estaciones fijas, por ser un elemento claramente localizado en el proceso de selección de ruta, se convierten en obstáculos para los transportistas que tratan de evadir la inspección de peso. Un problema es que cuando el tráfico aumenta a niveles que exceden la capacidad de revisión se forman colas, que generan conflictos en el desvío de camiones para inspección y en la reincorporación de los ya revisados al tráfico que cruza. En estas circunstancias, cierto número de camiones pasan la estación sin ser revisados, quizá llevando sobrepeso, tal como lo describen Benekohal, et al (1999) en un estudio de caso sobre conflictos de tráfico alrededor de estaciones de pesaje en Illinois (USA), donde, en ausencia de equipos de identificación automática de vehículos o de WIM, en promedio un 30%

de los camiones cruzando por la estación no pudieron ser pesados a fin de prevenir conflictos de formación de colas.

Tabla 4.8. Factores de las estrategias de inspección de pesos (US DOT, 2000)

Criterio	Instalaciones Fijas	Equipo móvil y WIM
Volumen de camiones verificado	De 700 a 800 por turno (2,500 diarios)	De 3 a 5 por hora
Uso de instalaciones y tecnología	Mejor en espacio y uso de tecnología	De adecuado a limitado
Costo de instalaciones	En el rango desde 1.7 hasta 5 millones de dólares	Costos de: terreno, equipo y señalización (US\$300,000 o más)
Necesidades de personal	24 horas, 2 días a la semana: equipo mínimo de 17 personas	8 horas de operación: al menos 2 inspectores requeridos *
Flexibilidad	Limitada	Muy flexible
Seguridad para personal, conductores y vehículo	Excelente	Pobre
Capacidad de disuasión/Visibilidad	Alta principalmente en los flujos vehiculares interestatales	Baja visibilidad baja. Gran disuasión en tráfico local. Vehículos en rutas alternas suelen evitar inspección.
<i>Sólo operación diurna. Es afectada por condiciones climáticas.</i>		

Un caso más extremo se ha documentado en el estado norteamericano de Virginia, por Taylor, Bergan y Berthelot (2000) quienes reportan cómo los camioneros se ponen de acuerdo para acosar a una estación, al organizarse en largas caravanas con la intención de abatir la capacidad de servicio de pesaje. Aparentemente, los camiones sobrecargados suelen ir al final del convoy para evadir la estación una vez que ésta se satura.

Otra estrategia común de los transportistas que quieren evitar la inspección es usar rutas alternas para esquivar la estación de pesaje. Esta circunstancia hace evidente la utilidad de las básculas portátiles y el equipo WIM, como estrategia adicional que complementa el esquema de estaciones fijas para hacer cumplir los reglamentos de pesos en vigor.

Un buen ejemplo de esto se reporta en un estudio de evasión a la inspección de pesos, patrocinado por el Departamento de Transporte de Florida (USA) (Cunagin, Mickler y Wright, 1997). A fin de estimar la eficacia de la coerción al cumplimiento del reglamento de pesos, Cunagin, et al, ensayaron cuatro estrategias, empezando sin inspección, y endureciendo la revisión hasta terminar con un nivel muy severo de inspección y sanciones, descritas como sigue:

Estrategia A. Las estaciones están abiertas. No hay multas ni patrullas en rutas alternas.

Estrategia B. Las estaciones están abiertas y no hay patrullas en rutas alternas, pero se levantan multas en los puntos donde se pesan camiones

Estrategia C. Las estaciones están abiertas y hay algo de patrullaje en las rutas alternas. Se levantan multas tanto en los puntos de pesaje como en las rutas alternas.

Estrategia D. Las estaciones están abiertas sólo por breve tiempo, con intenso patrullaje en rutas alternas principales y secundarias y en paraderos de descanso selectos. Hay multas tanto en las estaciones como en las rutas alternas.

Estas estrategias se ensayaron en seis lugares sobre el corredor I-95 en la región noreste de la Florida, donde dos estaciones de inspección fijas, y cuatro rutas alternas fueron monitoreadas con equipo WIM y patrullaje de vigilancia. Los sitios elegidos fueron:

Sitio 1: sobre el corredor I-95, con una estación de inspección y pesaje

Sitio 2: sobre la autopista US-17

Sitio 3: sobre la autopista US-1, con una estación de inspección y pesaje

Sitio 4: sobre la ruta de condado número 121

Sitio 5: sobre la autopista FL-2

Sitio 6: Sobre la autopista FL-121

Las rutas alternas para evitar las estaciones de inspección y pesaje cruzaban por los sitios 2, 4, 5 y 6.

El corredor elegido, con típico tráfico de gran volumen, se usa por camiones que mueven manufacturas hacia el sur de la Florida, y productos agrícolas hacia el límite norte del estado. Carga contenerizada moviéndose entre puertos de la Florida, Georgia y las dos Carolinas utilizan este corredor también. La fig 4.12 muestra el número de camiones que rebasaron el máximo peso permitido en la Florida; que se estimó de los datos presentados por Cunagin, et al. La gráfica muestra claramente la reducción en el número de violaciones al reglamento a medida que la vigilancia e inspección se reforzaron.

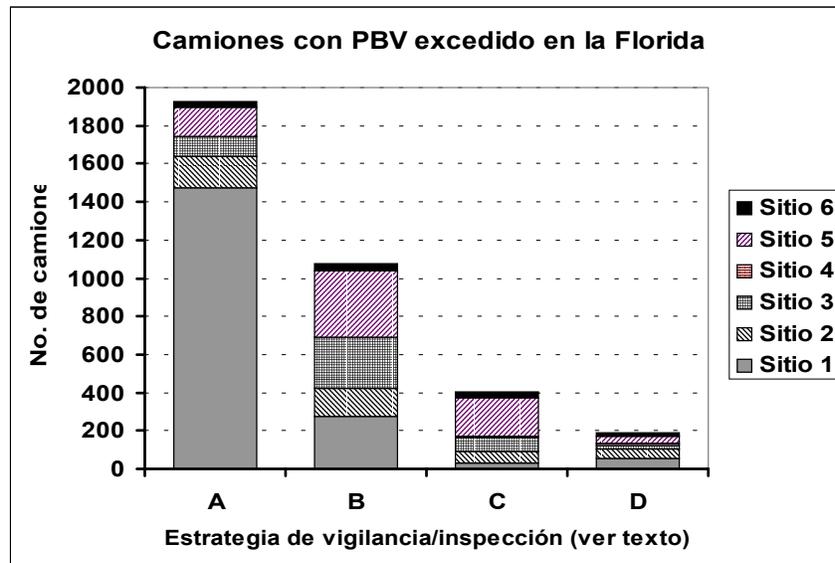


Figura 4.12. Efecto de la vigilancia en las violaciones al PBV máximo permitido en el estudio del Departamento de Transporte de Florida (FDOT) (basado en Cunagin, Mickler y Wright, 1997)

Una relación semejante la reportan Taylor, Bergan y Berthelot (2000) con base en estudios de siete agencias norteamericanas de vigilancia e inspección. La tabla 4.9 muestra los resultados.

Tabla 4.9. Tasas de ocurrencia de sobrepeso para distintos niveles de vigilancia (Taylor, Bergan y Berthelot, 2000)

Tasas de Ocurrencia de Sobrepeso		Alto nivel de vigilancia	Bajo nivel de vigilancia
Estado	No. de estaciones	% de camiones sobrecargados	% de camiones sobrecargados
Virginia	2	0.5 a 2.0%	12 a 27%
Maryland	2	1.0%	34.0%
Arizona	2	1.5%	30.0%
Wisconsin	3	1.0%	20.0%
Idaho	4	11.9%	32.0%
Florida	5	1.4%	13.0%
Montana	6	1.0%	29.0%

De manera complementaria, otras penalizaciones no monetarias y algunas consideraciones de diseño vehicular podrían contribuir a reducir las prácticas del sobrepeso. Diversos ejemplos de sanciones no financieras típicas en varios lugares del mundo se muestran en la tabla 4.10; todas ellas enfocadas a desalentar la sobrecarga.

De este tipo de penalizaciones, la detención del vehículo y la obligación de descargar el peso en exceso impactan severamente la actividad del transportista, debido al costo de mantener ocioso el camión detenido y al costo extra para retirar el peso excedido. Estas medidas, sin embargo, podrían ser de uso limitado en virtud del área que implícitamente se requiere para acomodar los vehículos detenidos así como las cargas excedidas resultantes, en particular si son productos perecederos (Paxson y Glickert, 1982).

Tabla 4.10. Ejemplos de penalizaciones no financieras por sobrepeso (basado en Euritt, 1987; OECD, 1988; Lowe, 2002 y SCT, 2003)

Lugar	Se detiene al vehículo	Penalizaciones no monetarias
Francia	Sí	Exceso en PBV: 5 días de cárcel la primera vez; 10 días si reincide. Exceso en ejes: 10 a 30 días la primera vez; 60 días si reincide
Alemania	Sí	De 1 a 3 puntos de penalización en el permiso de conducir
Japón	---	Cárcel hasta por 6 meses
México	Sí	Exceso en PBV: multa doble de lo normal para reincidentes en un periodo de un año. La segunda reincidencia implica la revocación del permiso
Holanda	Sí	---
Suiza	---	Cárcel
Texas (USA)	Sí	Exceso en PBV: hasta 60 días de cárcel la segunda vez, hasta 182 días en la tercera incidencia
Reino Unido	Sí	El operador se arriesga a perder su licencia tipo "O", y el conductor puede perder su licencia de chofer

Tocante a aspectos del diseño vehicular, un par de factores merecen alguna atención: a) el uso de suspensiones de aire; y b) el uso de ejes elevables.

Los beneficios de las suspensiones de aire se han analizado extensamente en el proyecto *DIVINE* (Dynamic Interaction between Vehicles and Infrastructure Experiment) de la OECD, el cual ha reportado que las suspensiones de acero contribuyen a un deterioro más acelerado comparadas con las de aire al mover cargas idénticas. De acuerdo con el estudio *DIVINE*, las suspensiones de acero deterioran los pavimentos al menos un 15% más aprisa que las suspensiones de aire (OECD, 1998, p. 11). El uso de vehículos con suspensiones neumáticas ha

favorecido cambios a las reglamentaciones respectivas, como en el caso de la modificación de 1999 que aumentó los límites del peso en el Sistema Nacional Carretero Australiano para camiones con suspensiones menos agresivas para el camino (Levins y Ockwell, 2000); así como la enmienda a las regulaciones británicas que aumentaron a 44 t el peso máximo permitido en camiones articulados de seis ejes y suspensión neumática o equivalente (Department for Transport, 2000).

En cuanto al eje elevable, se trata de un diseño que permite levantar el eje cuando no se necesita y bajarlo si se quiere mejorar la distribución de la carga total en los ejes. Este tipo de eje se usa ampliamente en Canadá y en los Estados Unidos, pero ha dado lugar a algunos usos inadecuados que ponen en duda su eficacia. Ya que en general es difícil dar vuelta con un camión cargado cuando los ejes elevables están en acción, los choferes acostumbra levantarlos a fin de facilitar la vuelta, pero esto los obliga a reajustarlos nuevamente para continuar el viaje (Hajek y Billing, 2002). Los conductores que dejan mal ajustado el eje elevable, ya sea para mejorar su consumo de combustible o por errores de apreciación, podrían incrementar el daño al pavimento a niveles mayores que los provocados si el eje elevable no estuviera instalado en el vehículo (US DOT, 2000, Vol. II, Chap. VI, pp 21-22).

4.5 Una aproximación hacia el control de sobrepeso

El modelado de la interacción entre el transportista y el responsable del camino en torno a la sobrecarga se basa en la hipótesis de que cada una de las partes tiene como objetivo minimizar sus propios costos de operación.

El responsable del camino, con mejor conocimiento de la situación, anticipa las reacciones del transportista a las posibles acciones disuasivas que puede tomar. Para reducir los niveles de sobrepeso, el responsable del camino implanta un esquema de penalizaciones, determinando las multas y la probabilidad de detectar transgresores; otras sanciones no financieras (por ejemplo, las mostradas en la tabla 4.9) sirven para reforzar el esquema de vigilancia.

Una vez que las toneladas a mover y la distancia a cubrir se determinan tanto por la demanda como por los requerimientos logísticos, el transportista –considerando el esquema de vigilancia que opera – elige el factor de carga que le minimiza el costo por tonelada-kilómetro, incluyendo el costo de la multa esperada.

El costo del transportista

Conociendo las toneladas a mover y la distancia a recorrer, el factor de carga elegido contribuirá a determinar el costo por tonelada-kilómetro. Suponiendo que se trata de un transportista racional que desea minimizar sus costos, se podría concluir que no desperdicia capacidad en el vehículo, y que el factor de carga elegido es por lo menos uno (o sea, carro completo).

De esta manera, para un tipo específico de camión que mueve **T** toneladas en un viaje de **d** kilómetros, si se denotan:

L = capacidad en toneladas del camión (la carga útil, el máximo legal permitido)

E = costo por kilómetro del movimiento vacío

x = factor de carga usado en el movimiento

p = probabilidad de detectar un vehículo sobrecargado

F = multa (en pesos) por cada tonelada en exceso del máximo permitido

entonces el costo esperado para el transportista, C_L , es:

costo de operación vehicular + costo de movimientos vacíos – multa esperada

Puesto que para mover el total de toneladas se necesitan $T/(Lx)$ camiones (o viajes de un solo camión), el costo esperado para el transportista es:

$$C_L = \frac{T}{Lx} [LxdV(x) + dE + FpL(x-1)] \quad \text{para } x \geq 1 \quad \dots [4.5]$$

que una vez simplificado resulta:

$$C_L = T \left[d \left(V(x) + \frac{E}{Lx} \right) + Fp \frac{x-1}{x} \right] \quad \text{para } x \geq 1 \quad \dots [4.6]$$

La probabilidad **p** en la ecuación 4.6 naturalmente depende del número de puntos de inspección que el responsable del camino instala en la red de caminos, pero también depende de la distancia **d** que recorre el camión; mientras más largo sea el viaje, mayor probabilidad se tiene de cruzar por algún punto de inspección.

Suponiendo una red de caminos de **N** kilómetros de extensión y un total de **w** puntos de inspección distribuidos de manera uniforme en la red, una primera aproximación a la probabilidad **r** de que un camión sobrecargado sea detectado en un tramo dado de un kilómetro es: **r = w/N**. De modo que la probabilidad de evadir la detección en un kilómetro dado es $(1 - r)$; mientras que la probabilidad de evadir la detección a lo largo de los **d** kilómetros a recorrer resulta: $(1 - r)^d$. Por tanto, una primera estimación de la probabilidad de detectar a un camión sobrecargado que recorre **d** kilómetros en la red está dada por:

$$p = 1 - (1 - r)^d \quad \dots [4.7]$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación 4.6 se obtiene el costo esperado para el transportista como:

$$C_L = T \left[d \left(V(x) + \frac{E}{Lx} \right) + F \left(1 - (1 - w/N)^d \right) \frac{x-1}{x} \right] \quad \text{para } x \geq 1 \quad \dots [4.8]$$

Cabe hacer notar que en lugar de esta aproximación gruesa a la estimación de la probabilidad p junto con la hipótesis de la distribución uniforme de los puntos de inspección en la red carretera, se pudo haber supuesto que los puntos de inspección en la red ya están ubicados, y que las tasas de detección son conocidas. Ya que durante el desarrollo de esta investigación no fue posible obtener los detalles de la última suposición, se adoptó esa primera aproximación, aunque la disponibilidad de datos sería de gran utilidad para un refinamiento futuro del modelo que se presenta.

Ya que tanto el nivel de la multa F y la probabilidad $r = w/N$ se determinan por el planificador del camino, el transportista elegirá el factor de carga óptimo x^* que minimiza el costo C_L en la ecuación 4.8. En esta ecuación puede observarse que para los fines de optimización del transportista, el tonelaje total a mover T , no es relevante; y como es de esperarse, el impacto de la multa en el costo C_L se nulifica cuando el factor de carga es $x = 1$.

El costo del responsable del camino

El costo de reparación del camino resulta del daño que los camiones ocasionan a la carretera de acuerdo con el factor de carga con el que operan. Para cada tipo de vehículo, el potencial de daño se evalúa a partir del costo unitario de daño U (en ESAL-km) y una función $g(x)$ que estima los ESALs que resultan del vehículo con un factor de carga x , así como de una distribución de cargas en los ejes particular a cada tipo de camión (nótese que en este modelado no se consideran los efectos de diseños alternos para la suspensión o los ejes, aunque con los datos adecuados esto podría agregarse en el futuro).

Para controlar a los camiones con sobrepeso, el responsable del camino dispone de w puntos de inspección en la red carretera, y fija una multa de F pesos por cada tonelada de exceso de peso transportada. El nivel de multa elegido F , debe ser lo bastante realista como para poderse aplicar (por ejemplo, no podría ser equivalente al costo de adquisición del propio vehículo).

El manejo y administración de las estaciones de inspección y pesaje representan un costo para el responsable del camino, aunque la recaudación de multas es un ingreso que en este modelo sirve para reducir los costos totales. De este modo el costo esperado para el planificador C_P , es:

costo de daño al camino – multa esperada + costo administrativo de inspección

En una red carretera con N kilómetros de extensión, w puntos de inspección y pesaje, y considerando que:

U = costo unitario de daño al camino en pesos por ESAL-km

x = factor de carga en el camión

$g(x)$ = función de estimación del número de ejes equivalentes (ESALs) en el camión, con base en su distribución de cargas en los ejes y el factor de carga x .

S = costo administrativo de una estación de inspección y pesaje

y el número de vehículos requeridos para mover T toneladas una distancia de d kilómetros es $\frac{T}{Lx}$.

Entonces, cada vehículo sobrecargado en el flujo de carga genera un costo por daño al camino igual a $Udg(x)$, con una multa esperada debido a las toneladas en exceso igual a $F(1 - (1 - w/N)^d)L(x - 1)$, resultando en el siguiente costo total esperado para el planificador del camino:

$$C_p = \frac{T}{Lx} [Udg(x) - F(1 - (1 - w/N)^d)L(x - 1)] + Sw \quad \text{para } x \geq 1 \quad \dots[4.9]$$

el que se simplifica a:

$$C_p = T \left[\frac{Udg(x)}{Lx} - F(1 - (1 - w/N)^d) \frac{(x - 1)}{x} \right] + Sw \quad \text{para } x \geq 1 \quad \dots[4.10]$$

Una interacción en dos niveles: la programación binivel

Puesto que el planificador busca controlar el daño provocado por el sobrepeso de los camiones, y al mismo tiempo éstos no perciben inmediatamente el daño a la infraestructura, el planificador debe ser la parte activa del problema dejando a los transportistas un papel pasivo ante las medidas de control que se implanten. Por ejemplo, considerando distancias de recorrido de d kilómetros, el planificador podría utilizar la ecuación 4.7 para estimar el número de puntos de inspección w_0 que se requieren para que la probabilidad de detectar a los transgresores esté en un valor predeterminado p_0 , con la expresión:

$$w_0 \geq N(1 - (1 - p_0)^{1/d}) \quad \dots[4.11]$$

En estas interacciones en torno a la ocurrencia de la sobrecarga en el autotransporte, el responsable del camino tiene una posición de ventaja ya que legalmente puede reglamentar las actividades del autotransporte de carga; generalmente dispone de información y tiene un mejor conocimiento de las posibles reacciones del transportista ante las posibles combinaciones de niveles de multa F y del número de puntos de inspección en la red carretera.

El esquema descrito se ajusta a un modelo de *programación binivel* en el cual hay dos actores: el *líder* (en este caso el planificador) y el *seguidor* (en este caso el operador), cada uno tratando de optimizar sus propias funciones objetivo, y cada

uno controlando sólo una parte de las variables de decisión que definen el proceso de interacciones. El enfoque de programación binivel permite modelar situaciones donde hay interacciones entre dos actores y a la vez los parámetros en el problema de optimización para uno actor resultan ser las variables de decisión en el problema de optimización de su contraparte, y viceversa.

En términos de las funciones objetivo de costo para el transportista y para el responsable del camino descritas en las ecuaciones [4.8] y [4.10] respectivamente, el problema de optimización que se busca resolver es el siguiente:

$$\text{Min}_{F,w} T \left[\frac{Udg(x)}{Lx} - F \left(1 - (1 - w/N)^d \right) \frac{(x-1)}{x} \right] + Sw$$

donde x es solución de :

$$\text{Min}_x T \left[d \left(V(x) + \frac{E}{Lx} \right) + F \left(1 - (1 - w/N)^d \right) \frac{x-1}{x} \right]$$

...[4.12]

sujeto a :

$$1 \leq x \leq 3$$

$$0 \leq F \leq F_M$$

$$1 \leq w \leq w_M$$

$$w \text{ entero}$$

donde se ha supuesto que 3 es el máximo factor de carga que físicamente puede soportar un camión; F_M es el máximo nivel aplicable de multa; y w_M el máximo número de puntos de inspección que el planificador puede instalar en la red carretera.

El problema de optimización [4.12] tiene la estructura de un *programa matemático* (Borowski y Borwein, 1989), donde hay una función objetivo (el costo del planificador), que depende de las variables de decisión del problema (x , F y w en este caso), y un conjunto de restricciones sobre las variables de decisión.

Lo que distingue al programa [4.12] de otros modelos como la programación lineal, la cuadrática o la no lineal, es que *entre las restricciones que la función objetivo del planificador debe satisfacer están las condiciones de optimización del transportista*; es decir, que una de las restricciones es en sí misma un problema de optimización, sujeto también a las mismas restricciones sobre las variables de decisión. Incluir como restricción del programa otro problema de optimización en sí mismo es tanto la ventaja de la programación binivel para modelar situaciones de conflicto, como la dificultad de encontrar algoritmos generales de solución.

Los problemas de optimización binivel han surgido como un enfoque prometedor para el modelado efectivo en la planeación del transporte, aunque este enfoque todavía carece de un algoritmo general de solución, como ocurre en otros modelos

como por ejemplo, la programación lineal o la programación cuadrática. Mucho del progreso de la programación binivel se ha basado en heurísticas que funcionan con esfuerzos computacionales y tiempos de respuesta razonables (Bell e lida, 1997, pp. 194-195; Yang & Bell, 2001). Para las interacciones entre transportista y planificador ya descritas es el mismo caso, y aunque el algoritmo general de solución podría ser muy difícil de encontrar, la estructura del problema expuesto permite un procedimiento de solución en dos etapas.

Eso se ilustra en la fig 4.13, donde la primera etapa corresponde a la búsqueda de los valores óptimos del factor de carga L_f^* que elige el transportista sujeto a cualquier combinación de las variables de control impuestas por el planificador del camino (esto es, L_f^* es una función que depende del nivel de multa F y del número de puntos de inspección w en la carretera), y la segunda etapa corresponde al problema de optimización del planificador, restringido a la región factible definida por la superficie que se generó en la primera etapa.

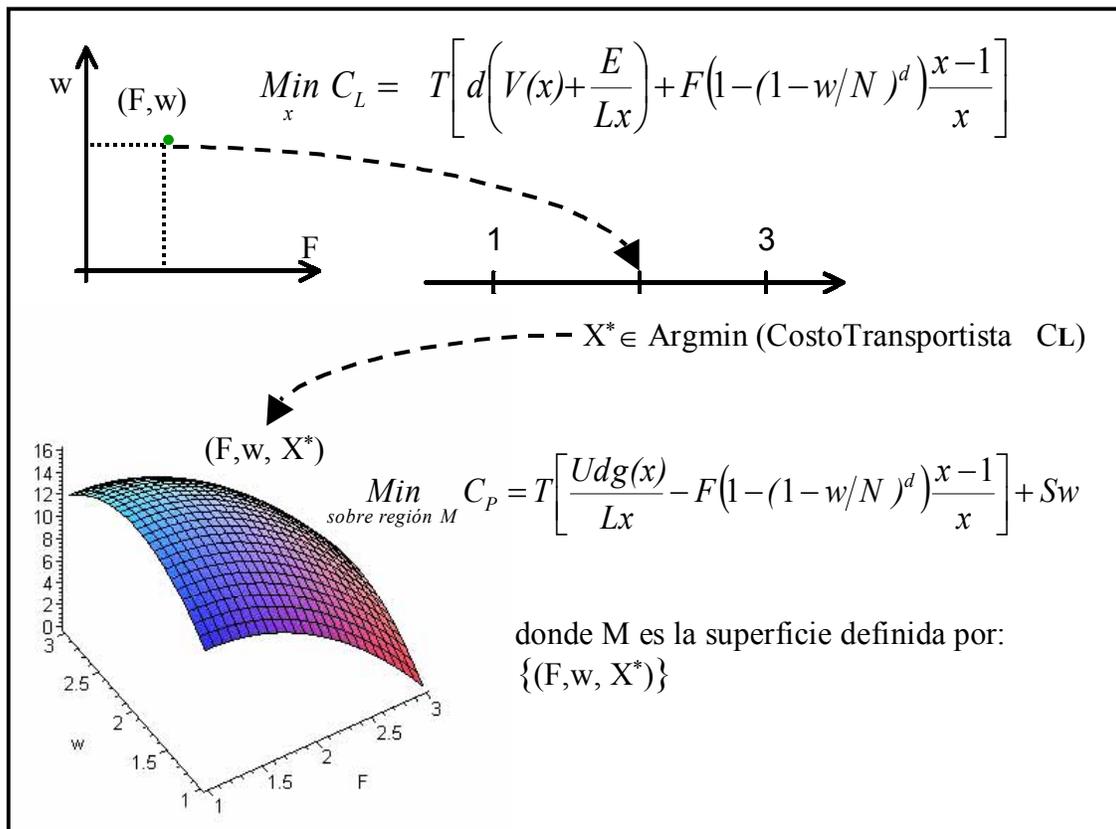


Figura 4.13. Un procedimiento de solución para el programa binivel

Esta aproximación a la solución difiere del procedimiento iterativo donde el planificador comienza la interacción tomando una decisión (por ejemplo, el nivel de multa), luego el transportista responde con su propia decisión (por ejemplo, cambiando de ruta), lo que a su vez lleva al planificador a reaccionar con otra decisión, y así sucesivamente; como ocurriría en el *juego no cooperativo de Nash* (ver, por ejemplo el trabajo de Fisk, 1984).

El procedimiento que se presenta en este trabajo, en vez de tratar de obtener la convergencia a la solución óptima a través de una serie de decisiones alternadas entre el transportista y el planificador, aproxima la solución óptima al minimizar la función objetivo del planificador sobre la región definida por la superficie que identifica las decisiones óptimas del transportista, sujetas a las medidas de control impuestas por el propio planificador. El problema de optimización binivel resulta ser entonces un proceso de toma de decisiones jerárquico, de manera que el responsable del camino, con la habilidad para pronosticar cualquier reacción del transportista, elegirá la combinación más apropiada de número de puntos de inspección en la red carretera y de niveles de multa aplicables para lograr el mínimo costo total del mantenimiento de la infraestructura.

5 Un modelo de programación binivel para el control de camiones con sobrepeso

En 1991, la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) comenzó a realizar un estudio de campo anual sobre el autotransporte de carga para coleccionar datos de los flujos vehiculares en la red carretera pavimentada. El principal objetivo fue mejorar el conocimiento que se tenía del tráfico carretero de carga, en virtud de que las fuentes usuales de esta información eran documentos tales como cartas de porte, permisos, pagos de impuestos y otras estimaciones que no podían dar detalle del tráfico local, las variaciones estacionales en los flujos vehiculares, o los movimientos de vacíos (Rico, et al, 1997). En el estudio de campo se identificó el tipo de vehículo usado, su peso y dimensiones; la clase de carga movida; el origen y destino del viaje; el tipo de embalaje y el mercado de la carga en tránsito: doméstico o internacional. De este estudio se obtuvo información de las prácticas de sobrepeso, lo que permitió tener una visión de la problemática en México basada en datos recientemente observados.

En este capítulo se tratan los hechos básicos alrededor de la problemática del sobrepeso en el autotransporte de carga que se mueve en la red carretera pavimentada en México, y se presenta un modelo de control de sobrepeso basado en el enfoque de programación binivel descrito en el capítulo anterior, así como algunos resultados numéricos.

5.1 El escenario del autotransporte de carga en México

Uno de los primeros resultados del estudio de campo del autotransporte de carga fue identificar los tipos de vehículo dominantes en el tráfico carretero. La tabla 5.1 muestra los cinco tipos principales encontrados en los estudios anuales entre 1991 y 1994, donde los camiones rígidos C2 y C3 representaban cerca del 60% de la flota.

Tabla 5.1. Los cinco tipos vehiculares principales (basado en Rico, et al, 1997)

Tipo	Clasificación	Max. PBV (en t)	Carga útil (en t)	Porcentaje del tráfico observado
Rígido 2 ejes	C2	17,5	9,8	39,6%
Rígido 3 ejes	C3	26,0	17,3	20,2%
Artic. 5 ejes	T3S2	44,0	25,0	22,0%
Artic. 6 ejes	T3S3	48,5	35,1	16,3%
Doble artic. 9 ejes	T3S2R4	66,5	48,0	1,9%

Esta distribución de tipos vehiculares ha cambiado en los últimos años, de manera que en 2002 se observó 41.2% de camiones rígidos C2 y C3 y 58.1% de camiones articulados. Los mismos cinco tipos, sin embargo, siguen siendo dominantes en los flujos carreteros de carga (SCT, 2002).

Respecto a la clase de productos transportados, los cinco tipos de vehículos han participado de manera distinta. Un vistazo a las toneladas movidas en 1996 se muestra en la tabla 5.2, donde se aprecia que los C3, T3S2 y T3S3 tienen la mayor participación, y que los productos industriales y los agrícolas representan la mayor parte de los movimientos.

Tabla 5.2. Toneladas promedio movidas en 1996 (basado en IMT, 2001, cuadro 4.2.5)

Tipo de producto	Tipo de camión						TOTAL	% por tipo de producto
	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	Otros		
Forestales	608	1720	2078	3130	411	322	8269	1.3%
Agrícolas	12665	28610	31119	27913	3655	2856	106818	17.4%
Animales y sus productos	4056	5811	13072	3653	379	1116	28087	4.6%
Minerales	177	580	2184	3618	29	122	6710	1.1%
Petróleo y derivados	2506	2723	8388	16905	9123	1200	40845	6.6%
Inorgánicos	2280	3641	8926	15406	2176	668	33097	5.4%
Industriales	25284	36560	113553	114454	27332	11121	328304	53.4%
Varios	6232	9462	19535	21212	4266	2161	62868	10.2%
TOTAL	53808	89107	198855	206291	47371	19566	614998	
% por tipo vehicular	8.8%	14.5%	32.3%	33.5%	7.7%	3.2%	100.0%	

En relación con la productividad del autotransporte de carga, la tendencia general ha sido creciente tanto para toneladas movidas como para toneladas-kilómetro, tal como se muestra en la tabla 5.3 para el periodo 1992-2002.

Tabla 5.3. Flujos carreteros en México, 1992-2002 (SCT, 2004)

Año	Toneladas (miles)	t-km (miles de millones)	Año	Toneladas (miles)	t-km (miles de millones)
1992	341,1	134,3	1998	380,8	179,1
1993	366,6	140,2	1999	394,4	184,6
1994	356,5	158,3	2000	413,2	194,1
1995	366,7	162,8	2001	409,2	191,9
1996	383,3	170,8	2002	411,1	192,9
1997	332,5	154,1	2003	416,2	195,2

La natural preocupación que este crecimiento de los flujos de carga carreteros representa para el responsable del camino encargado del mantenimiento, se intensifica aún más por la ocurrencia de sobrepeso en los vehículos de carga. De este modo, la motivación del planificador del camino para buscar medidas de control de este impacto resulta evidente.

5.2 La ocurrencia de sobrepeso

La ocurrencia de sobrepeso se ha observado en el estudio anual de campo referido en la sección anterior. Los diagramas de caja en la fig 5.1 muestran los porcentajes de camiones sobrecargados que se registraron en 88 estaciones de muestreo instaladas entre 1992 y 1997, clasificados por el tipo de camino en donde se localizó la estación.

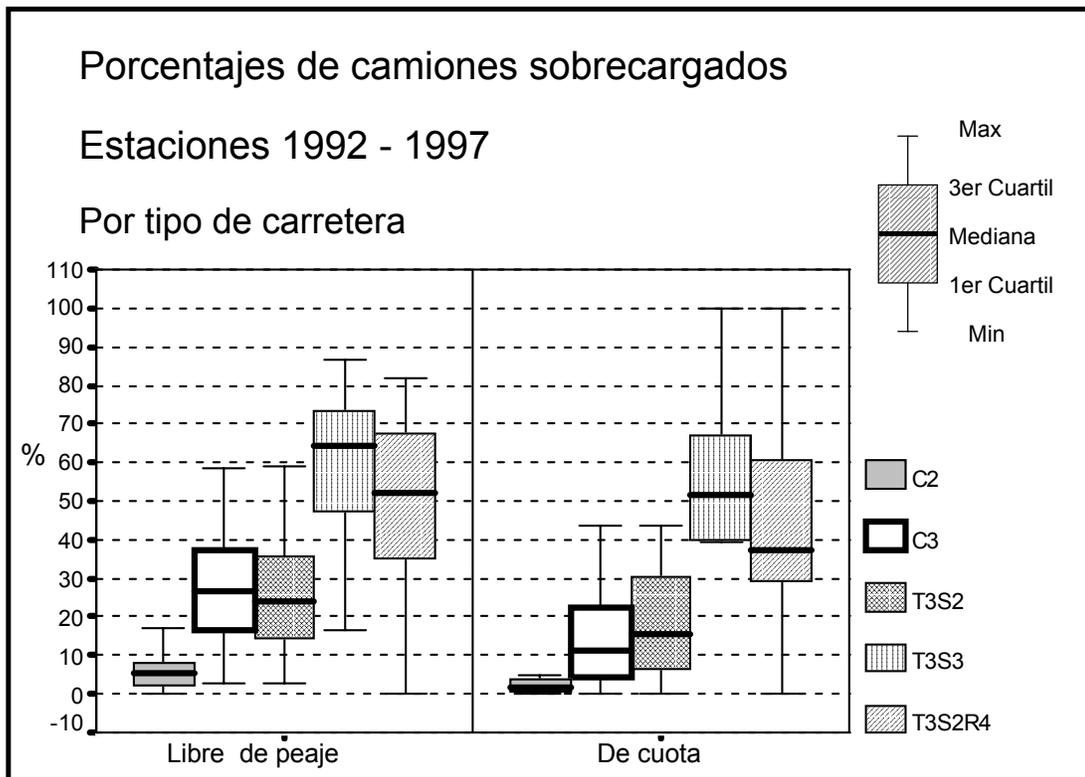


Figura 5.1. Porcentajes de camiones sobrecargados en las estaciones de muestreo entre 1992 y 1997 (con base en Gutiérrez y Mendoza, 2000)

La fig 5.1 en general sugiere que el porcentaje de camiones con sobrepeso en las carreteras de cuota son menores a los que ocurren en los caminos libres de peaje. Esto podría relacionarse con la preferencia de los camiones con sobrepeso por las

carreteras libres, pero también podría tener que ver con una vigilancia más frecuente y mejor organizada en las autopistas de cuota.

Una prueba de análisis de varianza (ANOVA) con los datos de la fig 5.1, agrupados por tipo de carretera, se presenta en la tabla 5.4. Esta tabla muestra que los camiones tipo C3 y T3S2 son los únicos casos estadísticamente significativos (valores de probabilidad $p < 0.05$) en un nivel de confianza del 95%, lo que sugiere que estos tipos de camiones sobrecargan de manera distinta en las carreteras libres que en las de cuota. Los valores de las medias se muestran en la Tabla 5.5, siendo mayor el sobrepeso en las carreteras libres que en las de cuota.

Tabla 5.4. Prueba ANOVA de los porcentajes de camiones con sobrepeso en las observaciones de 1992 a 1997, agrupados por tipo de carretera

		ANOVA				
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
C2	Between Groups	39.343	1	39.343	1.547	0.217
	Within Groups	2136.258	84	25.432		
	Total	2175.601	85			
C3	Between Groups	2290.576	1	2290.576	11.422	0.001
	Within Groups	17045.882	85	200.540		
	Total	19336.458	86			
T3S2	Between Groups	894.789	1	894.789	4.091	0.046
	Within Groups	18371.095	84	218.704		
	Total	19265.884	85			
T3S3	Between Groups	18.037	1	18.037	0.057	0.812
	Within Groups	26672.788	84	317.533		
	Total	26690.825	85			
T3S2R4	Between Groups	611.909	1	611.909	1.174	0.282
	Within Groups	41164.698	79	521.072		
	Total	41776.607	80			

Tabla 5.5. Medias de los porcentajes de los tipos C3 y T3S2 sobrecargados en las observaciones de 1992 a 1997, agrupados por tipo de carretera.

		Descriptives					
		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
						Lower Bound	Upper Bound
C3	Free	73	26.742	14.239	1.667	23.420	30.065
	Toll	14	12.779	13.723	3.668	4.855	20.702
	Total	87	24.495	14.995	1.608	21.300	27.691
T3S2	Free	73	25.336	14.756	1.727	21.893	28.778
	Toll	13	16.331	14.983	4.155	7.277	25.385
	Total	86	23.974	15.055	1.623	20.747	27.202

Las violaciones al máximo PBV permitido, se pueden estimar de los PBVs registrados en las encuestas de camino del estudio de campo ya citado. La tabla 5.6 muestra los PBV promedio registrados en las estaciones instaladas entre 1995 y 1997 junto con el factor de carga resultante para cada tipo de camión. En esta

tabla se aprecian factores de carga entre 1.2 y 1.3 para los cinco tipos principales de vehículos, así como los mayores valores de toneladas en exceso que mueven los camiones articulados, en comparación con lo que mueven los tipos rígidos.

Tabla 5.6. PBV promedio en camiones sobrecargados en las observaciones de 1995 a 1997 (con base Gutiérrez y Mendoza, 2000)

Tipo	Máx PBV legal (en t)	Máx carga útil (en t)	1995			1996			1997		
			PBV promedio (en t)	Tonela- das en exceso	Factor de carga	PBV promedio (en t)	Tonela- das en exceso	Factor de carga	PBV promedio (en t)	Tonela- das en exceso	Factor de carga
C2	17,5	9,8	19,5	2,0	1,20	20,3	2,8	1,29	19,8	2,3	1,23
C3	26	17,3	29,6	3,6	1,21	30,8	4,8	1,28	30,2	4,2	1,24
T3-S2	44	25	50,4	6,4	1,26	50,4	6,4	1,26	50,3	6,3	1,25
T3-S3	48,5	35,1	58	9,5	1,27	57,3	8,8	1,25	58,7	10,2	1,29
T3-S2R4	66,5	48	82,6	16,1	1,34	81,2	14,7	1,31	80,8	14,3	1,30

La fig 5.2 muestra los PBVs promedio del año 2001, para tres condiciones: movimiento vacío, movimiento dentro del reglamento y movimiento sobrecargado; así como el peso máximo permitido.

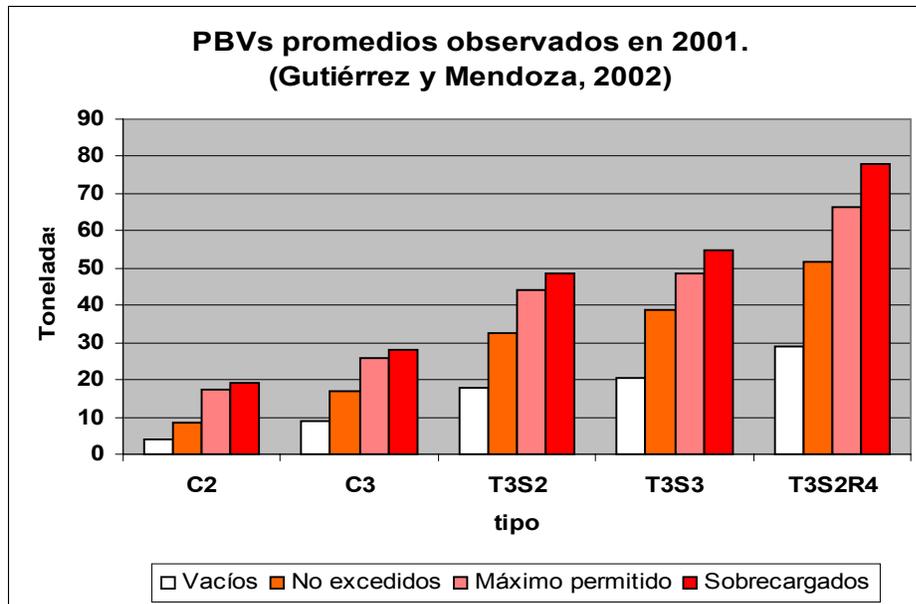


Figura 5.2. PBV promedio en las observaciones de 2001 (con base en Gutiérrez y Mendoza, 2001)

En la fig 5.2 puede notarse que los camiones que cumplen con el reglamento en promedio cargan menos de su máxima carga útil (algunos quizá con restricciones de capacidad en volumen) y que el impacto de los camiones articulados con sobrepeso es mucho mayor que el que generan los camiones rígidos.

El grado de sobrepeso para los ejes individuales en los camiones también se ha obtenido de las encuestas de campo. La tabla 5.7 muestra los cocientes entre el peso promedio en el eje y el peso máximo permitido en el eje para los cinco tipos

dominantes de camión observados, con datos de 92.113 vehículos que fueron registrados en 15 estaciones de muestreo (Rascón, et al, 1997, p.75). Los notables excesos del 16 y del 43% respectivamente para los ejes tractivos 2+3, y el triple tándem 4+5+6 en el camión articulado T3S3 resalta en esta tabla.

Tabla 5.7. Razones peso promedio en el eje a peso máximo permitido en el eje para los cinco tipos principales de vehículo (con base en Rascón, et al, 1997)

Tipo	Eje1	Eje2	Ejes 2+3	Ejes 4+5	Ejes 6+7	Ejes 8+9	Ejes 4+5+6
C2	0.51	0.72					
C3	0.66		0.95				
T3S2	0.63		0.80	0.88			
T3S3	0.64		1.16				1.43
T3S2R4	0.66		0.89	1.02	0.80	0.96	

La tabla 5.8 muestra el porcentaje de ejes excedidos con respecto al máximo peso permitido en el eje, que se obtuvo de las observaciones de 1996. Esta tabla indica que el eje doble tractivo 2+3, tanto en el camión rígido C3 como en todos los articulados representa la violación más común al peso máximo permitido en ejes, mientras que el eje 1 (de la dirección) resulta ser la violación menos común. El hecho podría estar relacionado con las variaciones en la distribución de la carga sobre la plataforma del camión, la cual casi no afecta al eje 1, en comparación con el resto de grupos de ejes.

Tabla 5.8. Porcentajes de ejes en exceso del peso máximo permitido en ejes. Observaciones de 1996 (Gutiérrez, et al, 1999)

Tipo	Eje sencillo		Eje doble				Eje triple
	1	2	2+3	4+5	6+7	8+9	4+5+6
C2	0.3	6.1	---	---	---	---	---
C3	2.9	---	33.0	---	---	---	---
T3S2	0.2	---	36.9	24.8	---	---	---
T3S3	1.3	---	49.0	---	---	---	34.5
T3S2R4	0.1	---	42.6	29.1	11.2	23.5	---

La vigilancia del cumplimiento de los pesos autorizados en los camiones se aplica tanto para el peso bruto vehicular como para el peso en ejes individuales o grupos de ejes. Además de la detención del vehículo y de las severas penalizaciones a los operadores que reinciden en sobrecargar, ya descritas en la tabla 4.10, los transgresores enfrentan multas crecientes según el grado de sobrepeso detectado.

La tabla 5.9 indica el esquema de multas aplicable en México para 2003; este esquema se actualiza cada año para seguir los incrementos al salario mínimo.

A pesar del escenario alrededor de las prácticas de sobrepeso que se percibe de estas tablas y figuras mostradas, la sobrecarga en México ha disminuido en años recientes.

Tabla 5.9. Multas por sobrepeso en el autotransporte de carga en México, en 1996 (SCT, 2003)

Exceso de peso	Multa en Pesos	
	min	max
0.050 to 0.500 ton	1,091.25	2,182.50
0.501 to 2.000 ton	4,365.00	6,547.50
2.001 to 3.000 ton	6,547.50	10,912.50
> 3 ton. Por cada ton:	3,273.75	4,365.00

En el estudio de campo de 2001 se reportaron PBVs promedio de 19.1; 28.1; 48.6; 54.6 y 77.9 t, para los tipos C2, C3, T3S2, T3S3 y T3S2R4, respectivamente. Todos estos valores son menores a los de la tabla 5.6 (Gutiérrez y Mendoza, 2002).

Sin embargo, la necesidad de abordar eficientemente el problema del control de vehículos sobrecargados resulta evidente, lo que se convierte en una motivación para ensayar un modelo que considere los principales elementos involucrados en las prácticas del sobrepeso.

5.3 El enfoque de programación binivel

El modelo de control de sobrepeso que se propone se basa en el problema de optimización binivel 4.12 referido en la sección 4.5 Las partes que interactúan en él son el responsable del camino, que desea minimizar los costos de mantenimiento del camino, y el transportista, que busca el factor de carga óptimo que minimiza el costo total del movimiento, incluyendo la multa esperada. El modelo supone que hay un tráfico determinado a mover, definido por el número de toneladas T que deben trasladarse d kilómetros, y un tipo de vehículo fijo.

El correspondiente programa binivel es el siguiente:

$$\text{Min}_{F,w} T \left[\frac{Udg(x)}{Lx} - F(1 - (1 - w/N)^d) \frac{(x-1)}{x} \right] + Sw$$

donde x es solución de:

$$\text{Min}_x T \left[d \left(V(x) + \frac{E}{Lx} \right) + F(1 - (1 - w/N)^d) \frac{x-1}{x} \right]$$

sujeto a:

$$1 \leq x \leq 3$$

$$0 \leq F \leq F_M$$

$$1 \leq w \leq w_M \quad \text{con } w \text{ entero}$$

donde:

U = costo unitario de reparación del camino por cada ESAL-km

x = factor de carga utilizado en el camión

g(x) es una función que estima el número de ejes equivalentes (ESALs) en el camión, basada en su distribución de cargas en los ejes y el factor de carga **x**.

L = capacidad del camión, es decir, la carga útil en toneladas

F = es la multa en pesos por tonelada llevada en exceso

W = número de puntos de inspección de peso en la red carretera

N = longitud total de la red carretera

S = costo administrativo de una estación de inspección y pesaje

V(x) es una función que estima el costo de operación vehicular por tonelada-kilómetro, y que depende del factor de carga **x**. Esta función se basa en las curvas de costo para el vehículo generadas con el paquete HDM-VOC v. 4.0

E = costo por kilómetro de un viaje del vehículo vacío

W_M y **F_M** son los valores máximos del número de puntos de inspección y del nivel de la multa que el responsable del camino puede manejar de manera realista

El límite superior para el factor de carga se definió como 3 en el problema 4.12 de la sección 4.5 porque concuerda con los efectos estimados de la combinación de potencia disponible en el motor del vehículo y la pendiente del camino para los cinco tipos principales de camión observados en las encuestas de campo. La fig 5.3 muestra la potencia disponible en operación graficada contra el factor de carga para los tipos C2 (el más ligero) y T3S2R4 (el más pesado), suponiendo un camino plano (pendiente 1%) y una velocidad de 60 km/h. En la gráfica puede notarse que para este caso, el tipo C2 no es capaz de llevar factores de carga mayores a 2,5; mientras que el tipo T3S2R4 difícilmente puede exceder la carga útil legal; es decir, un factor de carga igual a uno.

Tocante a la influencia de la pendiente del camino, la fig 5.4 indica la capacidad de ascenso graficadas contra el factor de carga para los mismos tipos vehiculares de la fig 5.3, suponiendo una velocidad de 60 km/h.

En la fig 5.4 se observa que la ocurrencia de sobrepeso (esto es, un factor de carga > 1) es posible para ambos tipos de camión, solamente en terreno plano: pendientes de menos del 2,5% para el tipo C2 y gradientes a lo más de 1% para el tipo T3S2R4. Aunque una reducción en la velocidad de los vehículos puede

ampliar las posibilidades de sobrecargar, basándose en los resultados de las Figuras 5.3 y 5.4, el valor de 3 parece bastante adecuado para representar el máximo factor de carga que puede llevar cualquier tipo de camión en el proceso de modelado.

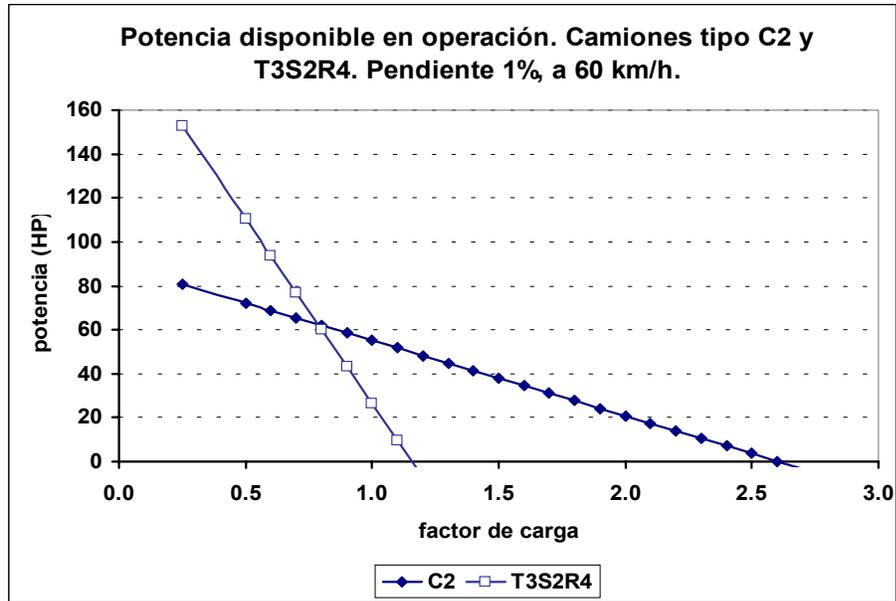


Figura 5.3. Potencia disponible en operación. Tipos C2 y T3S2R4 (basado en Arroyo y Aguerrebere, 2002)

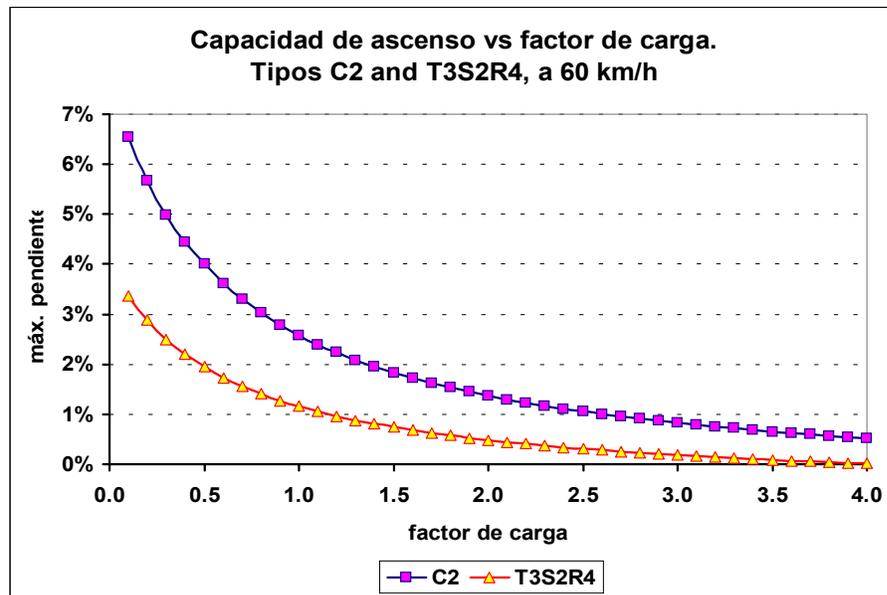


Figura 5.4. Capacidad de ascenso vs factor de carga. Tipos C2 y T3S2R4 (basado en corridas del HDM-VOC v 4.0)

La finalidad del ejercicio de modelación es encontrar el esquema de vigilancia óptimo para el responsable del camino, definido por el número óptimo de puntos

de inspección/pesaje w^* en la red carretera, y el nivel óptimo de multa F^* por tonelada en exceso detectada, que producen el mínimo costo de mantenimiento para el planificador; a la vez que el factor de carga x^* elegido por el transportista resulta ser el factor de carga óptimo que genera el mínimo costo de la operación de transporte, bajo las circunstancias de control impuestas por el responsable del camino.

Estimación de ejes equivalentes (ESALs) y costos de operación vehicular (COVs)

El modelo de programa binivel que se ha presentado requiere estimar las funciones $g(x)$ y $V(x)$ para cada tipo de vehículo modelado.

Las funciones $g(x)$ que dan el número de ejes equivalentes como función del factor de carga usado en el vehículo, se ajustaron a partir de cálculos de ejes equivalentes (ESALs) con base en los pesos de los ejes observados en cada tipo de vehículo en el estudio de campo de 1997. En ese año se pesaron 128.619 camiones en 20 estaciones de muestreo, y se pudieron obtener los pesos promedio de los ejes individuales y los grupos de ejes en cada tipo de vehículo. Utilizando estos pesos promedio en los ejes de los camiones se estimó el correspondiente valor de ESALs. La fig 5.5 muestra las estimaciones de ESALs contra el factor de carga para los tipos C3, T3S2 y T3S3, que movieron 15.2, 35.6 y 27%, respectivamente, (77,8% entre los tres tipos) del total de carga movida en ese año.

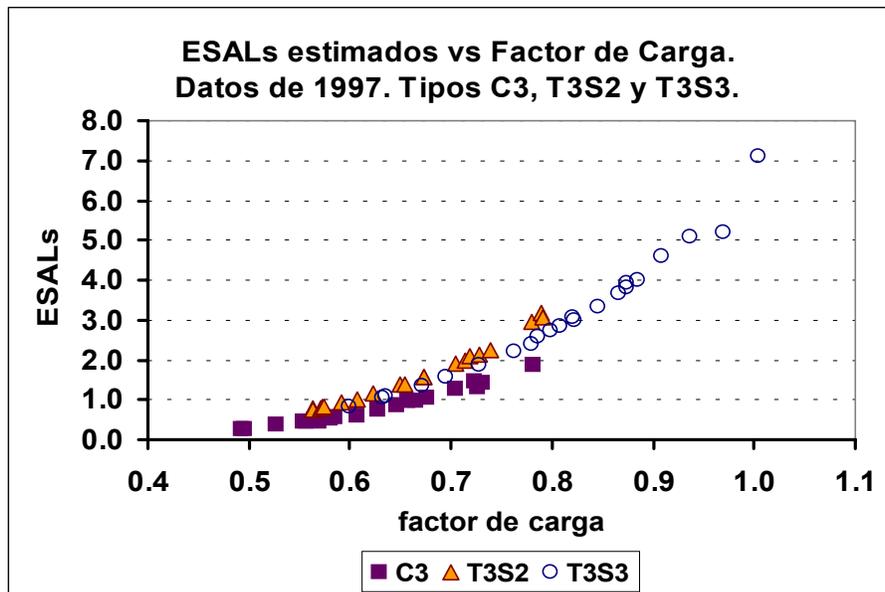


Figura 5.5. ESALs estimados vs factor de carga. Tipos C3, T3S2 y T3S2R4
Datos de 1997 (con base en Gutiérrez y Mendoza, 2000)

Las ecuaciones ajustadas para las funciones $g(x)$ se muestran en la tabla 5.10, junto con el valor de R^2 obtenido. La forma de un polinomio de grado 4 se eligió para representar la *Ley de la 4ª. Potencia*, y así adoptar un enfoque conservador en el objetivo de proteger la infraestructura.

Tabla 5.10. Ecuaciones ajustadas para funciones de ESALs, $g(x)$, en los cinco tipos principales de vehículo (con base en datos del estudio de campo en 1997, Gutiérrez y Mendoza, 2000)

Tipo	Ecuación ajustada para $g(x)$	R^2
C2	$y = 14.5x^4 - 25.8x^3 + 20.8x^2 - 6.6x + 0.7$	0.9998
C3	$y = 113.6x^4 - 292.9x^3 + 293.7x^2 - 129.4x + 21.1$	0.9931
T3S2	$y = 715.2x^4 - 1861.4x^3 + 1830.3x^2 - 797.1x + 129.7$	0.9984
T3S3	$y = 375.9x^4 - 1158.9x^3 + 1349.0x^2 - 690.3x + 131.0$	0.9902
T3S2R4	$y = -7.1x^4 + 47.4x^3 - 57.4x^2 + 28.7x - 4.9$	0.9829

Las curvas correspondientes a las ecuaciones de la tabla 5.10 se muestran en la fig 5.6 para factores de carga en el rango de 0,9 a 2,5. Las distintas tasas de crecimiento del número de ESALs con valores crecientes del factor de carga para los distintos tipos vehiculares resaltan en la fig 5.6. De esta manera, los tipos de vehículo pueden ordenarse de acuerdo con su rapidez de crecimiento en ESALs, como sigue: T3S2; T3S3; C3; C2 y T3S2R4. Esta observación, para fines de vigilancia e inspección, sugiere que los vehículos más controlados deberían ser el T3S2, seguido por el T3S3 y el C3.

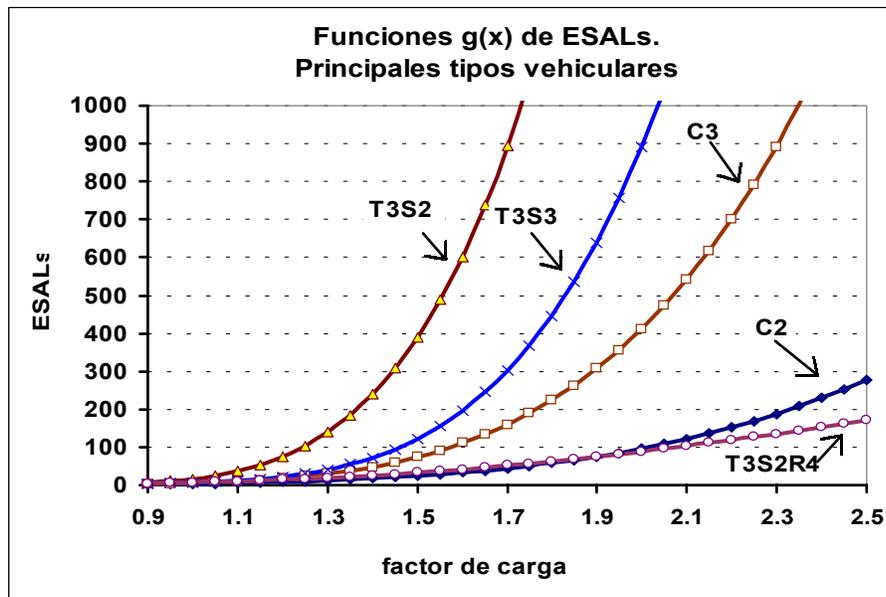


Figura 5.6. Funciones ESAL $g(x)$ para los cinco tipos principales de vehículo

En cuanto a la estimación de los costos de operación vehicular (COV), éstos se calcularon mediante varias corridas del paquete HDM-VOC v 4.0 utilizando costos unitarios del año 2001 reportados por Aguerrebere y Arroyo (2002) para los cinco tipos principales de vehículos. El tipo de camino supuesto en las corridas del paquete fue uno de rugosidad moderada (IRI = 2,5 m/km); pendiente media, del 3% y curvatura horizontal de 100°/km.

El Anexo B contiene un reporte del paquete HDM-VOC v 4.0 para el camión tipo T3-S2 con carga completa de 25 t y una velocidad deseada de 100 km/h, que es la que el vehículo podría mantener si no hubiera efectos de pendiente y curvatura en el camino (Archondo y Faiz, 1994, p. 66).

En el Anexo C se muestra la tabla de sensibilidad para el mismo tipo T3-S2, con cargas crecientes de 25 a 75 t, en pasos de 2,5 t, desglosando los costos en sus componentes.

El concepto de “Retención de la carga”, que se refiere al costo en pesos por hora del retraso en la entrega de la carga, se estimó mediante valores del tiempo (VDT) en pesos por hora calculados en 1992 para camiones mexicanos en un reporte del Banco Mundial (Gwilliam, 1997), con el supuesto de que el VDT es la suma del costo de retención de la carga, el salario del conductor y el costo de la mano de obra de mantenimiento; los dos últimos datos se obtuvieron del estudio de Arroyo y Aguerrebere (2002) citado anteriormente. La tabla 5.11 muestra los resultados, una vez que el VDT fue ajustado con índice de inflación a precios de 2001, para coincidir con los precios unitarios usados en las corridas del HDM-VOC v 4.0.

Tabla 5.11. Componentes del costo de operación vehicular que varían con el tiempo. Pesos de 2001 por hora (con base en Gwilliam, 1997; Arroyo y Aguerrebere, 2002)

	Valor del Tiempo (VDT)	Costo de retención de la carga	Costo de los operarios	Costo de mano de obra de mantenimiento
C2	71.87	1.97	38.83	31.07
C3	143.31	73.94	38.30	31.07
Articulados	143.31	67.86	44.38	31.07

La fig 5.7 muestra las curvas de costos de operación vehicular en pesos por tonelada-kilómetro, graficadas contra el factor de carga para los cinco tipos principales de vehículo obtenidas de las corridas del HDM-VOC 4.0.

El último punto graficado en cada curva de la fig 5.7 corresponde al máximo factor de carga que fue posible utilizar en el paquete de cómputo con cada tipo vehicular,

antes de que se produjera un error y la consecuente parada del programa, asociados al patinaje del vehículo, dada la curvatura del camino modelado.

Las partes decrecientes de las curvas en la fig 5.7 resultan del efecto atenuante que tiene en el costo promedio el prorrateo entre un número cada vez mayor de toneladas movidas; es decir, aumentando el factor de carga en el camión. Las partes crecientes en las curvas de costo en dicha figura se relacionan con el rápido aumento en los conceptos de costo dependientes del tiempo, pues mayores factores de carga alargan los tiempos de viaje al reducir la velocidad del vehículo.

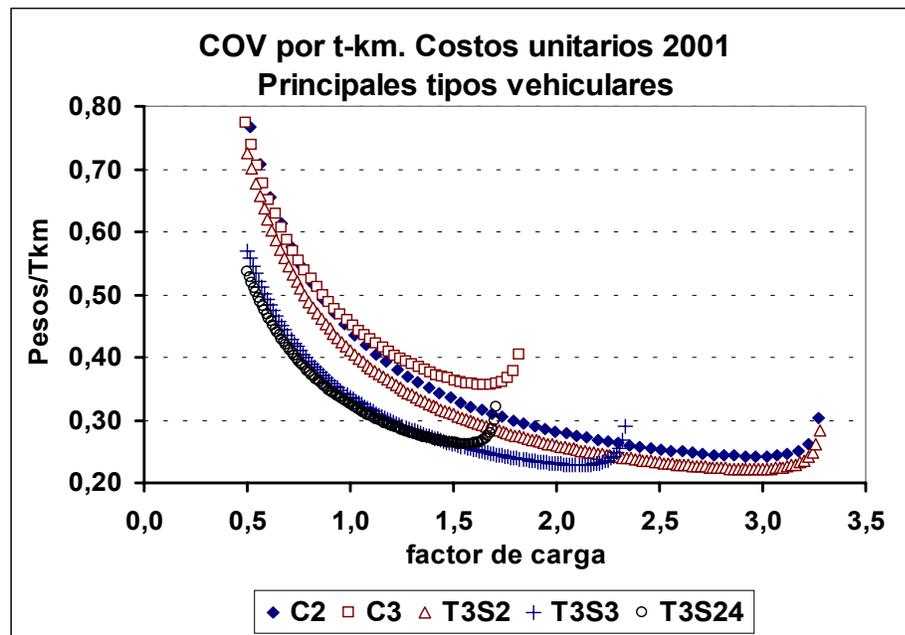


Figura 5.7. Costo de operación vehicular (COV) para los cinco tipos principales de camión (con base en corridas del HDM-VOC v 4.0)

La fig 5.8 muestra los principales componentes del costo de operación vehicular graficados contra el factor de carga en el rango de 1.0 a 3.2, para el tipo T3S2. Las curvas resultantes revelan el rápido crecimiento de los conceptos de costo que dependen del tiempo, principalmente por la retención de la carga, el salario de los operarios y la depreciación, al aumentar el factor de carga.

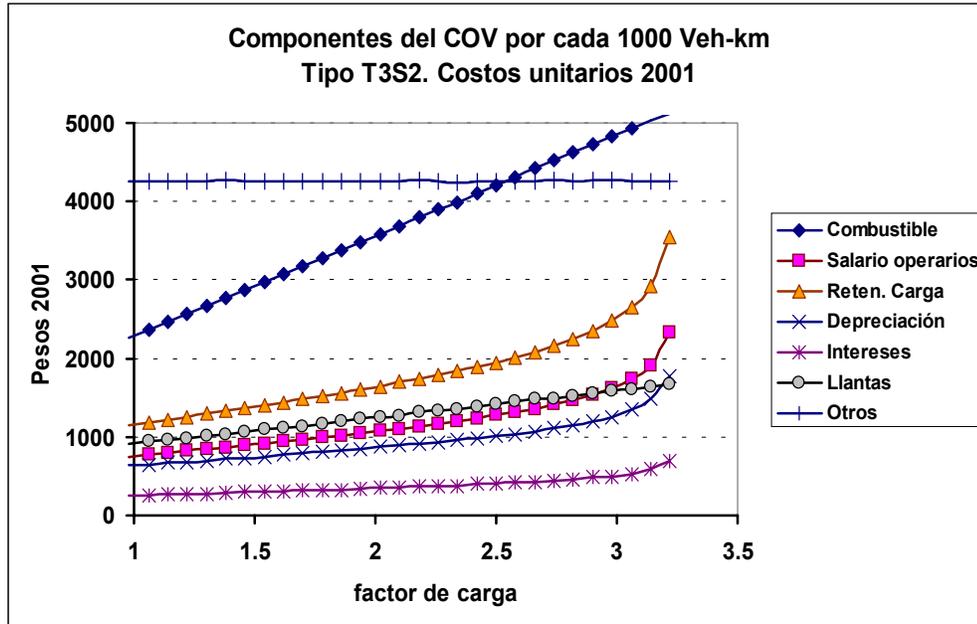


Figura 5.8. Componentes del costo de operación vehicular en el tipo T3S2 (con base en corridas del HDM-VOC v 4.0)

Con base en las observaciones anteriores, funciones de costo de operación vehicular por t-km $V(x)$ se ajustaron a partir de los datos usados para generar la fig 5.7. La ecuación general usada para el ajuste fue:

$$V(x) = \frac{a}{x} + b_0 + b_1x + b_2x^2 \quad \dots[8.1]$$

El término $\frac{a}{x}$ en la ecuación 8.1 reproduce el efecto decreciente de promediar costos entre un número mayor de toneladas; mientras que el término cuadrático $b_0 + b_1x + b_2x^2$ reproduce el rápido aumento en los costos que dependen del tiempo, y que se hacen notorios con factores de carga elevados.

En la tabla 5.12 se muestran las ecuaciones ajustadas para las funciones $V(x)$ con los valores de R^2 obtenidos.

Tabla 5.12. Ecuaciones ajustadas para funciones de costo de operación vehicular por t-km, V(x) en los cinco tipos principales de vehículo (con base en corridas del paquete HDM-VOC v 4.0)

Tipo	Ecuación ajustada para V(x)	R ²
C2	$y = \frac{0.311}{x} + 0.182 - 0.067x + 0.019x^2$	0.996
C3	$y = \frac{0.226}{x} + 0.456 - 0.371x + 0.141x^2$	0.997
T3S2	$y = \frac{0.284}{x} + 0.180 - 0.068x + 0.018x^2$	0.997
T3S3	$y = \frac{0.183}{x} + 0.264 - 0.161x + 0.051x^2$	0.993
T3S2R4	$y = \frac{0.118}{x} + 0.458 - 0.407x + 0.152x^2$	0.994

Contando con estos elementos de modelado, el procedimiento de solución para el problema de programación binivel se desarrolla a continuación.

El procedimiento de solución para el programa binivel

El procedimiento para resolver el problema de optimización descrito en las ecuaciones 4.12 básicamente consiste en la búsqueda de las condiciones de optimalidad para el transportista, cuyo costo $C_L(x | w, F)$ depende del factor de carga usado x , dados el número de puntos de inspección en la red carretera w y el nivel de multa F impuestos por el responsable del camino, y luego utilizar estas condiciones de optimalidad para restringir el problema de optimización del responsable del camino, cuyo costo $C_P(w, F | x)$ depende del número de puntos de inspección w y del nivel de multa F , que se han escogido anticipando su efecto sobre el factor de carga x que usará el transportista en sus operaciones.

Al sustituir las ecuaciones para las funciones $V(x)$ de la ecuación 5.1 en la ecuación general del costo de operación 4.8, y luego de simplificar el costo de operación para el transportista resulta:

$$C_L(x | w, F) = \frac{T\left(d\left(a + \frac{E}{L}\right) - F\left(1 - (1 - w/N)^d\right)\right)}{x} + \dots [5.2]$$

$$Tdb_1x + Tdb_2x^2 + T\left(db_0 + F\left(1 - (1 - w/N)^d\right)\right) \quad \text{para } x \geq 1$$

Para cada pareja de valores del número de puntos de inspección y el nivel de multa (w, F) que imponga el responsable del camino, la ecuación 5.2 da el costo total del transportista como una función del factor de carga x .

En vez de buscar el factor de carga óptimo exacto x^* que minimiza la ec 5.2, bajo un esquema de vigilancia (w, F), lo que llevaría a un problema de optimización no lineal mixto-entero; se usa una simple rutina exhaustiva que estima el valor

mínimo de C_L , con un programa en FORTRAN 95 que evalúa iterativamente la expresión 5.2 en pasos predeterminados de x , w y F . Una razón práctica para hacer esto, aparte de evitar las dificultades computacionales ligadas al carácter entero del problema de optimización, es que en la práctica las multas no cambian continuamente, sino en saltos discretos con un significado económico para el transportista que sobrecarga (p ej, aumentar la multa por unos cuantos centavos, tal vez no sería percibida como significativa). Igualmente los factores de carga no cambian continuamente, sino en incrementos con sentido práctico para los transportistas (p ej cargas extra menores a 20 kg, quizá no impactarían el movimiento del camión).

Las Figura 5.9 y 5.10 muestran curvas en el espacio que representan el factor de carga óptimo x^* sobre una región de valores (w, F) que podría elegir el planificador, para el caso de los tipos vehiculares C3 y T3S2. En este ejemplo el recorrido es de 850 km, para mover un total de 600 t. Las funciones de costo de operación vehicular por t-km $V(x)$ usadas aparecen en la tabla 5.12. El rango de multas usado fue de 3.000 a 4.500 pesos por tonelada de exceso, en pasos de 50 pesos; y el número de puntos de inspección en la red carretera varió entre 1 y 25.

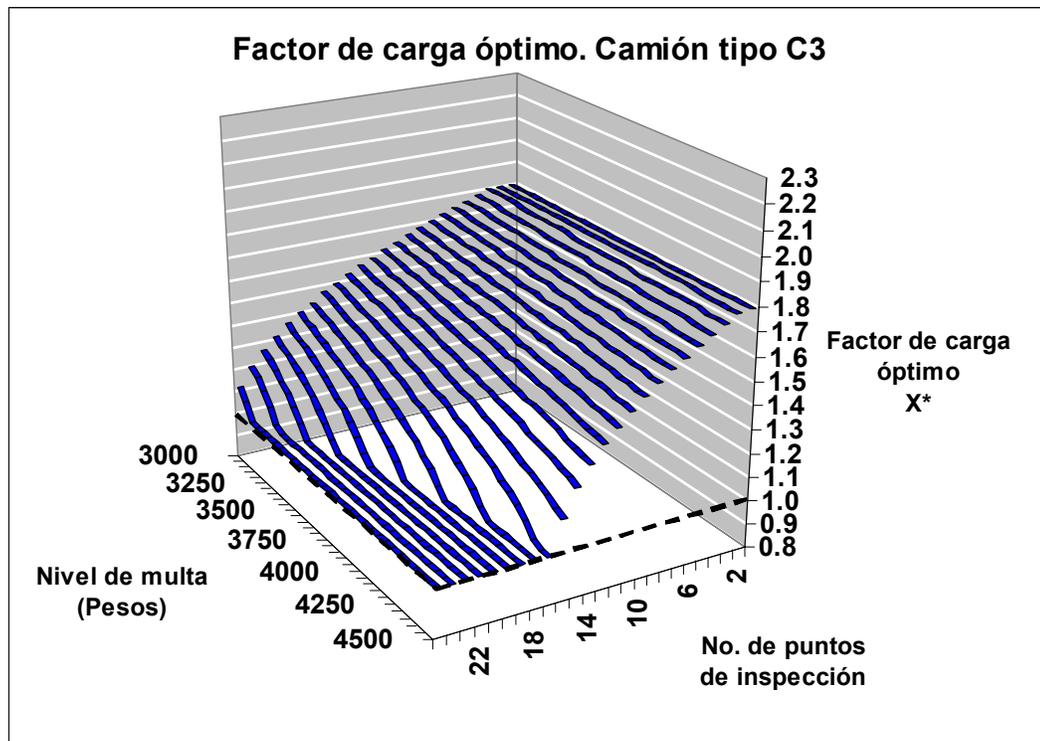


Figura 5.9. Factores de carga óptimos para el tipo C3, como función del número de puntos de inspección y el nivel de multa

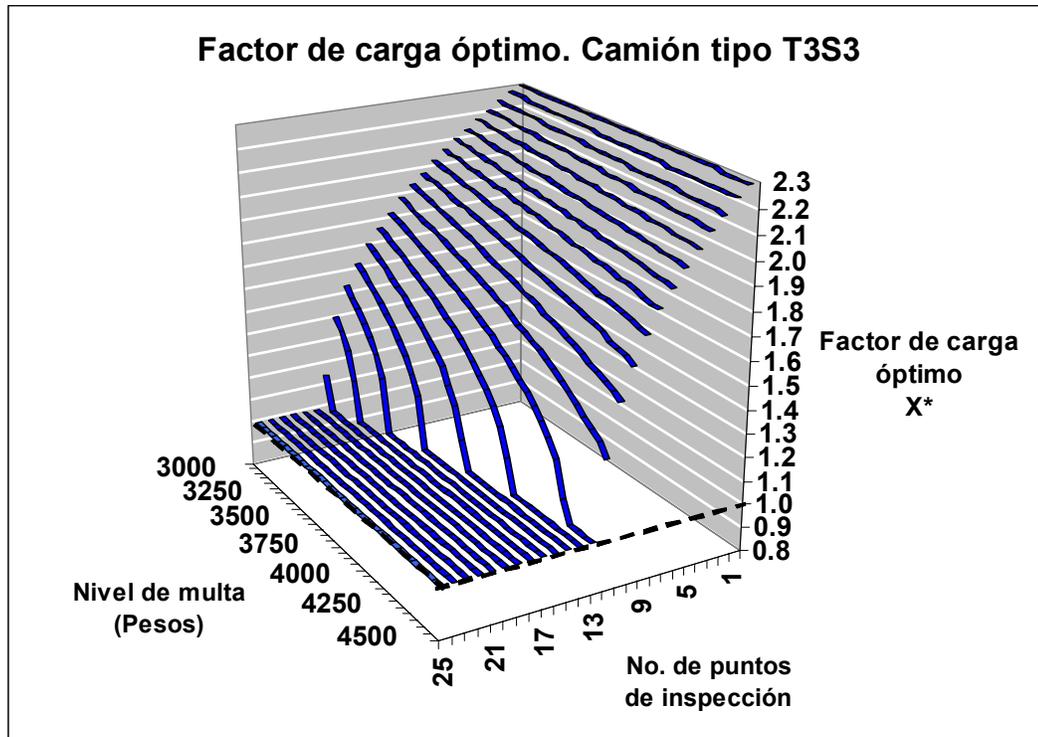


Figura 5.10. Factores de carga óptimos para el tipo T3S3, como función del número de puntos de inspección y el nivel de multa

La longitud total de la red carretera supuesta fue de 110.000 km, un valor cercano a la extensión de la red carretera pavimentada en México en 2001, para coincidir con los valores de costo unitarios usados en el ajuste de las curvas de costo de operación vehicular $V(x)$.

Las Figuras 5.9 y 5.10 muestran el efecto de disuasión que el incremento en las multas y en el número de puntos de inspección en la carretera tienen en el valor del factor de carga óptimo x^* que minimiza el costo de operación para cada tipo vehicular en la ecuación 5.2. Ambas gráficas indican cómo a medida que se instalan más puntos de inspección en la red carretera y se aumentan los niveles de multa, las curvas de costo se aplanan para ajustarse al valor de factor de carga óptimo $x^* = 1$, que corresponde a la carga útil legalmente permitida (suponiendo que la carga es lo bastante densa como para no tener restricciones de capacidad cúbica en la caja del camión).

Una vez calculados los factores de carga óptimos x^* sobre la región de valores (w, F) , el costo total para el responsable del camino pudo calcularse. Sustituyendo las funciones de estimación de ESALs $g(x) = n_4x^4 + n_3x^3 + n_2x^2 + n_1x + n_0$ de la tabla 5.10 y la relación entre x^* y (w, F) en la ecuación 4.10 de costo de mantenimiento del camino se obtiene el costo total del planificador como una función que depende del número de puntos de inspección w y el nivel de multa F , y que toma en cuenta la reacción del transportista al esquema de vigilancia, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$C_p(w, F | x^*) = \frac{TUd(n_4x^{*4} + n_3x^{*3} + n_2x^{*2} + n_1x^* + n_0)}{Lx^*} - \dots [5.3]$$

$$TF(1 - (1 - w/N)^d) \frac{(x^* - 1)}{x^*} + Sw$$

en donde el valor x^* es en sí mismo una función de w y de F que refleja el proceso de decisión del transportista.

Las figs 5.11 y 5.12 representan las curvas de costo total del responsable del camino, para los camiones tipo C3 y T3S3 referidos previamente en las figs 5.9 y 5.10.

Las dos gráficas en las figs 5.11 y 5.12 muestran la tendencia decreciente del costo total del planificador a medida que más puntos de inspección y mayores niveles de multa se aplican. En concordancia con las respuestas de los transportistas, las decisiones del planificador en las figs 5.9 y 5.10, muestran que las curvas de costo total para el responsable del camino se aplanan, acercándose a un valor mínimo alrededor de la región de valores (w, F) donde los transportistas prefieren mover sus cargas dentro de los límites de peso legalmente permitidos (es decir, factor de carga = 1,0) a enfrentar la multa esperada que resulta del esquema de vigilancia.

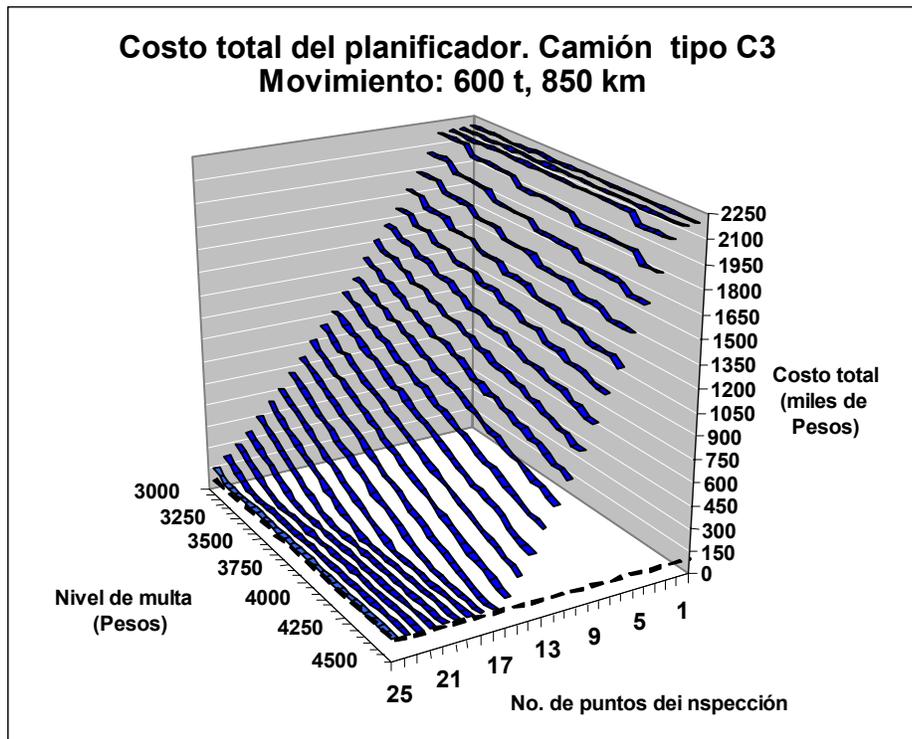


Figura 5.11. Costo total del planificador como función del número de puntos de inspección y el nivel de multa, anticipando la reacción del transportista. Ejemplo con camión tipo C3

Aunque las curvas de costo de las figs 5.9 a 5.12 podrían refinarse más por medio de una selección de intervalos más cortos en los incrementos del nivel de multa durante el procedimiento de evaluación, el incremento elegido para la estimación de costos (50 pesos) parece un intervalo práctico para ensayar el procedimiento de solución del programa binivel, y verificar la consistencia de tener respuestas de sobrepeso reducido por parte de los transportistas, ante el endurecimiento del esquema de vigilancia impuesto por el planificador.

El procedimiento ilustrado se repitió para los cinco tipos principales de vehículo detectados en las encuestas de campo, con las mismas suposiciones de tonelaje total movido, y distancia recorrida usadas en los ejemplos de camiones C3 y T3S3.

En el desarrollo de ambos ejemplos, el valor de costo total mínimo C_P^* , así como combinaciones óptimas del número de puntos de inspección w^* y del nivel de multa F^* (que minimizan el costo total del planificador tomando en cuenta las reacciones del transportista) se estimaron con los resultados numéricos del procedimiento de solución. Los resultados se muestran en la tabla 5.13

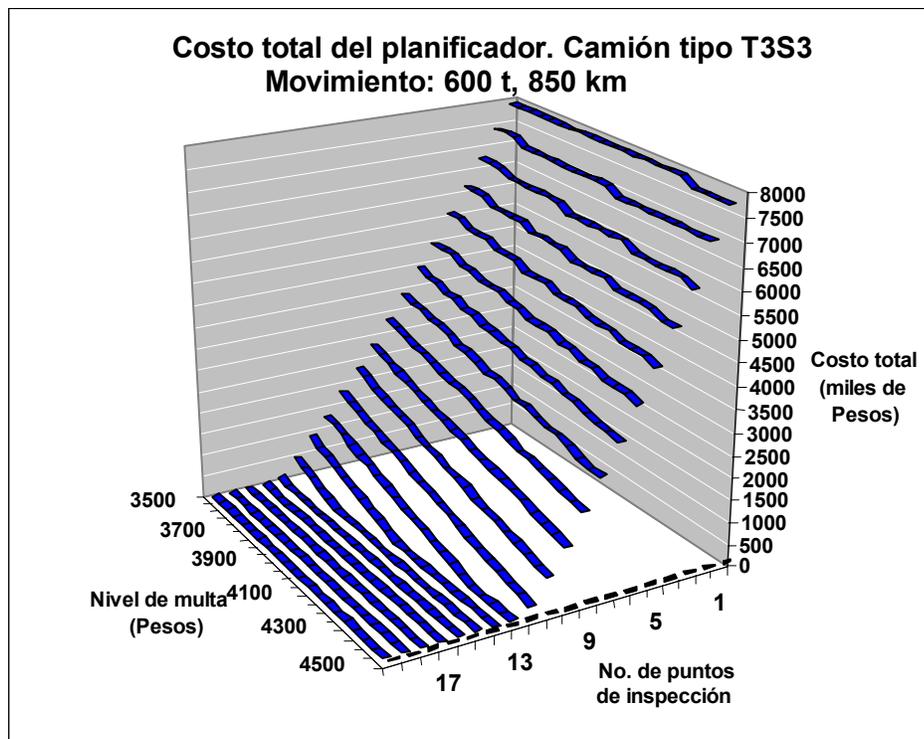


Figura 5.12. Costo total del planificador como función del número de puntos de inspección y el nivel de multa, anticipando la reacción del transportista. Ejemplo con camión tipo T3S3

Tabla 5.13. Valores óptimos estimados en el problema del costo total del planificador

Tipo	Nivel de multa óptimo	No. óptimo de puntos de inspección	Costo total mínimo estimado para el planificador
C2	4400	19	122,184.13
C3	4500	17	116,508.65
T3S2	4500	17	212,907.59
T3S3	4400	13	64,894.13
T3S2R4	4400	11	43,227.96

Los valores óptimos del nivel de multa en la tabla 5.13 resultaron bastante cercanos, aunque no puede decirse lo mismo respecto a los números óptimos de puntos de inspección en la red carretera. De las figs 5.11 y 5.12 puede notarse que hay una región plana donde el responsable del camino logra el costo total mínimo, consistente en múltiples combinaciones de nivel de multa y número de puntos de inspección, que le permiten al planificador adoptar distintos esquemas de vigilancia, y aun así obtener el costo total mínimo.

De esos distintos esquemas de vigilancia, aquellos que tengan niveles muy severos de multa y números modestos de puntos de inspección en la carretera parecen ser más fácilmente aplicables que aquellos con niveles moderados de multas pero con vigilancia intensiva a fin de incrementar la probabilidad de detectar transgresores. Una razón que apoya esta observación se encuentra en el costo que tiene implantar cada una de las opciones: mientras que fijar niveles de multa elevados, aunque aplicables, es un problema de tipo administrativo, intensificar los niveles de vigilancia implica un gasto adicional en equipamiento y personal que probablemente tenga un impacto el presupuesto corriente del responsable del camino. Por otra parte, una vez que un esquema de vigilancia se ha implantado, generalmente es más sencillo modificar el nivel de las multas vigente, que modificar las operaciones de vigilancia en uso.

Desde el punto de vista del transportista que sobrecarga, en tanto que los niveles de multa a los que puede hacerse acreedor son fácilmente conocidos, dado el carácter objetivo que la reglamentación vigente conlleva, la probabilidad de ser detectado con sobrecarga es una cuestión más bien de estimación o de experiencia personal del transportista, lo que añade cierta incertidumbre al proceso de decisiones de éste.

Tocante al esquema de vigilancia e inspección, como una primera estimación, los valores en la tabla 5.13 dan una idea al responsable del camino del esfuerzo que se requiere a fin de minimizar el costo total que tiene el controlar el flujo de camiones sobrecargados para cada uno de los cinco tipos principales de vehículos.

6 Conclusiones

6.1 Conclusiones

El flujo de camiones con sobrepeso en el transporte carretero de carga es un problema ampliamente extendido en el mundo industrializado, que creció junto con la evolución del autotransporte como el modo dominante en los movimientos de carga terrestre a finales del siglo XX, y que se ha exacerbado debido a los grandes incrementos de flujos carreteros que se han observado tanto en América del Norte como en Europa.

Los tres escenarios de autotransporte de carga revisados en este trabajo: México, los Estados Unidos y la Unión Europea, han mostrado elementos comunes en la discusión de los puntos centrales alrededor del movimiento carretero de carga. Los tres escenarios cubren una buena parte del mundo industrializado, y en los tres casos la importancia del autotransporte de carga en la actividad económica y en la prosperidad nacional se ha reconocido a la vez que los impactos negativos de esta actividad tanto en la infraestructura como en el medio ambiente.

En respuesta a diversos cambios manifestados al término del siglo XX, y con base en sus respectivos ejercicios de prospectiva, los tres países iniciaron una remodelación del autotransporte de carga, que en cada caso se convirtió en el modo dominante en los movimientos terrestres, y tiene impactos que requieren controles adecuados en áreas como: daño a la infraestructura; reglamentaciones de pesos; emisiones contaminantes y congestión; así como en aplicación de cargos a usuarios de la infraestructura.

En cada caso, las discusiones alrededor del transporte carretero de carga se refieren de manera natural a un ambiente con múltiples actores, incluyendo a los productores, consumidores, consignadores, transportistas, planificadores de caminos, operadores logísticos, además de los interesados en la infraestructura y grupos ambientalistas.

Las distintas iniciativas que resultaron, desde el ejemplo mexicano del Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional hasta la creación de cargos a usuarios derivados de los esfuerzos parlamentarios en Europa, sin duda tendrán un impacto significativo en la situación actual del transporte carretero de carga. El objetivo de controlar el predominio del autotransporte de carga así como sus efectos negativos es común a las políticas de estos protagonistas; circunstancia que abre espacios para los planificadores en el área de transporte de carga.

Coincidentemente en los tres casos, la necesidad de un apoyo institucional específicamente enfocado a problemas del autotransporte de carga, así como un

financiamiento perdurable para llevar a cabo los correspondientes programas, ha sido abiertamente admitido y promovido.

Dos atributos fundamentales del camino reconocidos ampliamente por los planificadores son: la *capacidad* para permitir el flujo vehicular con mínima congestión y la *durabilidad* para permitir el paso de camiones pesados de carga con el mínimo daño al pavimento. Estos atributos, sin embargo, se han abordado separadamente en dos clases de enfoques. Mientras que los estudios económicos se han concentrado en la congestión, los estudios ingenieriles se han concentrado en el daño al pavimento y el financiamiento carretero. Una estrategia común en estos dos enfoques consiste en el diseño de cargos a los usuarios del camino, ya sean por congestión o para recuperar los costos del daño a la infraestructura (Small, Winston y Evans, 1989).

En el caso del daño al pavimento, otras estrategias que no se basan en cargos son posibles, como se ha visto en las recomendaciones de utilizar vehículos con más ejes; procurar distribuciones más homogéneas de la carga sobre las plataformas de los camiones; o el uso de suspensiones de aire que resultan menos agresivas que las convencionales de acero, conforme el capítulo 4.

La modelación del problema de sobrepeso en este trabajo siguió un enfoque de sistemas. Una ventaja de este enfoque es que el transporte carretero de carga puede representarse como un conjunto de elementos que interactúan para transformar las entradas al sistema (matriz origen-destino, reglamentaciones de tránsito, flotas vehiculares, etc) en las salidas del sistema (flujos de vehículos, daño al pavimento, peaje colectado, etc), las cuales pueden ser controladas a fin de mantener estas salidas dentro de metas previamente establecidas por el planificador.

El uso de diagramas de influencia para las situaciones bajo análisis revela las cadenas de causa-efecto, así como la formación de ciclos que sugieren directamente los elementos involucrados y las entidades numéricas que resulta pertinente considerar para las tareas de modelado a fin de alcanzar los objetivos de control trazados por el planificador.

La modelación del autotransporte de carga difiere en mucho de su paralelo cercano, que es el transporte de pasajeros. Entre las diferencias encontradas, la presencia de múltiples actores interviniendo en el proceso de toma de decisiones para el autor transporte parece ser la característica más notoria, ya que representa una restricción en la selección de metodologías adecuadas destinadas a tratar problemas del transporte carretero de carga. En relación con esto, cabe hacer notar que, aun cuando la literatura sobre transporte de carga reporta una diversidad de estudios, la mayoría de éstos se refieren a los actores que operan sobre las redes carreteras, esto es: cargadores, operadores logísticos, y transportistas, más que a planificadores.

La coexistencia de múltiples actores interviniendo para determinar el tráfico de carga en carretera plantea el problema de reconciliar los objetivos distintos y a menudo conflictivos de estos actores. En el contexto del problema del sobrepeso y su control, los involucrados son el planificador responsable del buen estado del camino, y el transportista que mueve sus cargas en la red carretera. Ambos guían sus acciones tratando de minimizar sus costos, los cuales se calculan con base en un conjunto de parámetros y variables de decisión propios de cada uno de ellos.

La trabazón entre estos actores surge del hecho de que las variables de decisión de una parte son al mismo tiempo parámetros en el problema de minimización de costo del otro actor, y viceversa. Esta interdependencia, aunada al conflicto que hay entre los objetivos de estos actores sugiere el uso de la programación binivel como una adecuada técnica de modelación.

El hecho de que el daño al camino no se perciba inmediatamente por los transportistas, combinado con el incentivo económico implícito en la práctica de sobrecarga enfatiza el papel emprendedor que el responsable del camino tiene en esta interacción binivel. Su responsabilidad de mantener la infraestructura en niveles apropiados para la operación, y la facultad que tiene este actor de imponer medidas de control confirman la posición de iniciativa que el planificador tiene en las interacciones. Por tales razones, al planificador se le asigna el papel de “líder” en el modelo de programación binivel, justamente porque en la realidad este actor *tiene la capacidad* de imponer regulaciones al autotransporte de carga a fin de lograr sus objetivos.

El transportista en el papel reactivo de “seguidor” mantiene sin embargo, su libertad para buscar operar a costo mínimo ante cualquier circunstancia que enfrente. De este modo el responsable del camino, conociendo de antemano la respuesta racional del transportista, trata de minimizar el total de sus gastos de reparaciones al camino originadas por el tráfico de carga, admitiendo como una restricción el comportamiento racional del “seguidor” (el transportista), quien a su vez minimiza el costo operativo de mover sus cargas. Ésta es la mecánica básica del modelo de optimización binivel.

En relación con la estimación del daño al pavimento, el paradigma de la Ley de la 4ª Potencia, pese a las críticas recientes que han sugerido más bien una relación de 3ª potencia entre el impacto de daño al camino y los pesos en los ejes de los vehículos, es un criterio que hace evidente que el daño al pavimento crece de manera muy acelerada, a medida que los pesos en los ejes de los vehículos se incrementa.

En cuanto al problema del sobrepeso, el estímulo económico implícito para el transportista se ha visto claro a través de la reducción del costo promedio por tonelada-kilómetro, que beneficia tanto al transportista privado como al dedicado al servicio público federal, independientemente de si los transportistas tienen o no conciencia del daño al camino que genera esta práctica.

Aparte del esquema de vigilancia e inspección que la autoridad de la carretera tenga en funcionamiento, la sobrecarga en los camiones se limita naturalmente por la potencia del motor; por la pendiente dominante en el camino; por la densidad de la carga; y por los requerimientos logísticos de velocidad mínima aceptable para el transporte de carga.

En este trabajo se identificaron tres condiciones necesarias para la ocurrencia del sobrepeso : 1) la posibilidad física de sobrecargar, que tiene que ver con el tipo de carga movida y las características del camino y del vehículo; 2) la motivación económica a llevar sobrepeso, que responde a la mejora en la productividad del transportista obtenida al reducir el costo promedio por tonelada-kilómetro; y 3) la vulnerabilidad de los sistemas de vigilancia, que tiene que ver con la imposibilidad práctica de contar con sistemas de coerción al cumplimiento completamente infalibles, que a la vez no resulten excesivamente costosos.

Estas consideraciones sugieren que los transportistas que mueven cargas con posibilidades de sobrepeso tienen que decidir, conociendo la potencia de sus motores y las características del camino, cuál es el factor de carga que les permita una mínima velocidad de operación y un desempeño aceptables, para reducir el número de viajes, además de las penalizaciones por retrasos en la entrega de cargas.

Productos de baja densidad (por ejemplo, corcho, alfalfa, bagazo de caña, jabón en hojuelas, cereales para desayuno, éter, etc) y caminos con pendientes y/o curvaturas de consideración, simplemente no permiten la práctica de sobrecargar. En contraste, los caminos en terreno plano o de lomerío (pendientes de menos del 6%) y las cargas con densidades medias o altas (arena, acero, agua, petróleo, etc) siempre dan oportunidad para sobrecargar a los vehículos, muy particularmente en los movimientos de carga a granel, donde el embalaje no limita el uso del volumen disponible en el camión.

Por otra parte, los vehículos que transportan cargas de densidad considerable sin incurrir en sobrepeso, usualmente tendrán algún volumen no utilizado; mientras que aquellos que se dedican a cargas de baja densidad y tratan de ocupar todo el tonelaje permitido, podrían exceder la capacidad de volumen, incurriendo en exceso de dimensiones, particularmente en altura.

Dada la potencia fija en el motor de un vehículo, la potencia disponible para el movimiento se ve afectada por la pendiente del camino, de modo que a fin de mantener una velocidad de operación aceptable, el operador tiene que limitar el número de toneladas en tránsito en caminos de pendiente media o considerable. La reducción en velocidad que debe aceptar el transportista a fin de llevar más toneladas en caminos con pendiente o también en aquellos de mucha curvatura no siempre es deseable; así por ejemplo, los productos perecederos o los insumos para la manufactura "justo a tiempo" difícilmente aceptarán el retraso implícito y probablemente estos movimientos serán menos propensos a sobrecargar.

Tocante a la tarea de hacer cumplir el reglamento de pesos vigente, la autoridad de carreteras puede aumentar el grado de coerción elevando el nivel de multas dentro de rangos practicables (es decir, niveles realistas y pagables por los transportistas), así como incrementando la probabilidad de detectar a los transgresores por medio del esquema de vigilancia e inspección en la red carretera. En relación con la estimación de la probabilidad p de detectar a los camiones sobrecargados propuesta en la ecuación 4.7, cabe hacer notar que en lugar de esta primera aproximación al valor de p , junto con la suposición de puntos de inspección uniformemente distribuidos en la red, pueden lograrse mejores estimaciones de las observaciones del análisis estadístico de campo, o de la implantación de esquemas mucho más aleatorios de revisión, que dificulten a los transportistas sobrecargados la identificación de patrones de vigilancia a los que pudieran eludir de modo sistemático.

En lo que toca a los planificadores y a los responsables del camino, el interés renovado en estudiar el transporte carretero de carga en la literatura reciente, ha revelado que los planificadores del camino a nivel mundial se involucran cada vez más en actividades de planeación relacionadas con el movimiento de carga en las redes carreteras. Las experiencias referidas en el capítulo 2 de México, de los Estados Unidos y de la Unión Europea muestran que a fin de resolver los impactos y problemas que surgen en el transporte carretero de carga, se empieza a pensar ya en un respaldo institucional así como de un financiamiento dedicado al desarrollo de diversos programas de acción hacia la búsqueda e implantación de soluciones, y que el papel del planificador no se limite a la actitud de brindar un buen servicio y a su compromiso con el mantenimiento de la calidad de las carreteras en niveles aceptables, sino ampliarse a una actitud de iniciativas, que guíen las respuestas de los usuarios de la infraestructura hacia el objetivo del interés social que implícitamente está contenido en la protección y preservación de la infraestructura carretera.

6.2 Líneas de trabajo futuro

Los niveles de sobrecarga detectados en el Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional, a pesar de la tendencia decreciente del exceso en PBV de los últimos años, sigue siendo un asunto relevante que requiere la búsqueda de controles apropiados para atenuar los impactos de esta práctica. Dicho estudio ha probado ser una valiosa fuente de información que aporta datos reales del tráfico carretero de carga de gran utilidad para el diseño de políticas de control, lo que reafirma la necesidad de mantener este estudio como una tarea permanente que respalde el trabajo de los planificadores del camino.

Los datos colectados sobre las configuraciones vehiculares con mayores incidencias de violaciones al reglamento de pesos, así como los principales tipos de productos que mueven (p ej fig 5.1 y tabla 5.2) sugieren que podría darse más atención a estos tipos vehiculares durante las rutinas de vigilancia e inspección.

Al diseñar esquemas de vigilancia y sus penalizaciones, considerar características básicas de una sanción puede ser una guía útil. Conforme a lo reportado por Faia (2000) en su trabajo de modelado de camiones de carga incurriendo en exceso de velocidad, los científicos sociales han identificado cuatro características básicas relacionadas con cualquier castigo impuesto por alguna acción criminal: a) la probabilidad de ser descubierto; b) la severidad de la sanción; c) la rapidez con la que la autoridad aplica el castigo; y d) la perseverancia de la sanción; es decir, la percepción que se tenga de advertencias previas, invitando a cesar la acción ilegal. La información que difunda el planificador del camino acerca de la severidad de las sanciones al sobrepeso, y de la rapidez de su aplicación dan al transportista una estimación objetiva del riesgo que implica sobrecargar sus camiones.

En relación con las interacciones en el problema del sobrepeso, la natural interrelación que se da entre las variables de decisión del actor con la iniciativa (el planificador) y los parámetros del actor que reacciona (el transportista), y viceversa, descrita en las ecuaciones 5.2 y 5.3 encaja adecuadamente con la mecánica de la programación binivel.

Aunque el modelo presentado no es demasiado complicado, y el número de variables manejado permitió una visualización gráfica de los efectos que cada actor ejerce sobre su contraparte; en un caso más general, los problemas de programación binivel requieren algoritmos eficientes para encontrar una solución óptima. Dado que a la fecha no se ha desarrollado ningún algoritmo general para los programas binivel, en muchos de los casos reportados en la literatura se han desarrollado heurísticas particulares para encontrar soluciones aproximadas.

Ahora bien, ya que la modelación de las respuestas de los actores en el problema del sobrepeso implica cálculos de costos para cada uno de ellos, buenas estimaciones tanto del costo de operación vehicular (COV) para los transportistas, así como del impacto de daño al camino son necesarias. Las estimaciones del COV en esta investigación, utilizando el software HDM-VOC v 4.0 del Banco Mundial parecen ser aproximaciones razonables, aun cuando este paquete se desarrolló originalmente para operaciones normales de carga (esto es, sin sobrepeso). Cálculos más precisos del COV de los distintos tipos vehiculares bajo diversos escenarios operativos, seguramente mejorarán los cálculos de las respuestas del transportista en el proceso de modelado.

De esta manera, independientemente del algoritmo que sea necesario usar para resolver el programa binivel, un factor fundamental para tener buenos pronósticos del comportamiento del transportista y del costo para el planificador del camino, es el conocimiento de las funciones de costo de operación vehicular $V(x)$ para el transportista, así como las de estimación de factores de daño expresadas en ejes equivalentes (ESALs) $g(x)$ para cada configuración vehicular. En el futuro habrá estimaciones más precisas de estas funciones que seguramente mejorarán la capacidad del modelo para evaluar tanto las reacciones de los transportistas como los impactos del sobrepeso en las carreteras.

En cuanto a las medidas de control de camiones sobrecargados, que complementan al esquema de vigilancia e inspección en funciones, la promoción de ciertas prácticas tales como el uso de vehículos con un número mayor de ejes; la distribución de las cargas sobre las plataformas, de manera más uniforme; y el uso de suspensiones neumáticas tal como lo recomienda el proyecto DIVINE de la OCDE (OCDE, 1998), puede contribuir a reducir la afectación de la infraestructura.

Tocante a los peajes del sistema de autopistas de cuota en México, que tiene cargos que crecen con el número de ejes de los vehículos, puede notarse que en virtud de que los vehículos con más ejes distribuyen mejor las cargas y tienen en general menores coeficientes de daño (ESALs); una revisión al diseño de los peajes a fin de tener más equidad y cobrar de acuerdo con la capacidad de daño de los vehículos puede ser una línea de investigación a desarrollar.

De la información aportada por el estudio estadístico de campo, una particular circunstancia puede observarse: dado que los camiones que no sobrecargan tienen pesos brutos vehiculares promedio menores al máximo PBV que especifica el reglamento (suponiendo que no hay restricciones por capacidad cúbica), y al mismo tiempo, los camiones con sobrepeso presentan excesos notables en el PBV, en especial para las configuraciones articuladas, teóricamente podría pensarse en una “redistribución de las cargas movidas” a fin de que los excesos de carga de los sobrepesados se pasaran a las capacidades subutilizadas de los vehículos que no sobrecargan. La implantación práctica de esto, naturalmente se ve seriamente limitada por la diversidad de cargas que hay con distintas características físicas, de embalaje, así como de origen y destino.

Sin embargo, esta circunstancia invita a pensar en el efecto total de los ejes equivalentes (ESALs) del total de movimientos de carga, y puesto que los camiones que no sobrecargan, en promedio imponen al camino una menor cantidad de ESALs de lo que pudieran imponer si cargaran al máximo permitido de reglamento, entonces esta holgura de ejes equivalentes no usados “absorbería” el exceso de ESALs de los camiones sobrecargados. La evaluación de esta posible compensación de ejes equivalentes puede ser una línea de investigación futura que aporte nuevos elementos a la discusión sobre mantenimiento de pavimentos.

Finalmente, con respecto a la discusión sobre el papel que la densidad de la carga movida tiene en la posibilidad de sobrecargar, la discusión del capítulo 4 ha mostrado que para muchas cargas de densidad media o alta, no se utiliza toda la capacidad cúbica del camión. Así, por ejemplo, con base en los datos de los autotransportes y las cargas de las tablas 4.1 y 4.2, un embarque de azufre (densidad = $2,00 \text{ t/m}^3$) en un camión tipo C2 completamente cargado (9,776 t) ocupa $4,89 \text{ m}^3$ de los $32,8$ disponibles, mientras que uno tipo C3 completamente cargado (17,3 t) llena solamente $8,64 \text{ m}^3$ de los $34,4$ disponibles en ese tipo de vehículo. Si la carga es de café en grano (densidad = $0,56 \text{ t/m}^3$), los camiones C2 y C3 requerirían volúmenes de $17,5 \text{ m}^3$ y $30,1 \text{ m}^3$, respectivamente.

Esta observación podría usarse como inicio de una línea de investigación orientada al rediseño de la capacidad cúbica de los camiones, *siempre que la carga transportada pueda conocerse razonablemente*. De este modo, reduciendo

la capacidad cúbica subutilizada, p ej acortando la altura de la caja de los vehículos, se pudiera tener un *control visual* de éstos, detectando rápidamente a aquellos que no pueden sobrecargar; lo que facilitaría las tareas de vigilancia. Un posible impacto de este rediseño sería la reducción de la resistencia aerodinámica, descrita en la ecuación 4.1, en virtud de la posible disminución del área frontal proyectada; la mejora en el rendimiento de combustible podría añadirse como beneficio adicional a este rediseño.

Los requerimientos de diseño mecánico relacionados con la estabilidad del vehículo, o la adecuación del tren motriz tendrían que ser tomados en cuenta.

Anexo A. Reporte típico del paquete HDM-VOC v 4.0

Este reporte se generó con el paquete HDM-VOC 4.0 del Banco Mundial para el vehículo muestra que se incluye con el software y que aparece clasificado como “camión mediano” (Medium Truck), que corresponde a un camión rígido de dos ejes con PBV de 16 t y una carga útil de 11 t. El paquete estima los costos de operación vehicular (COV) una vez que se cargan los datos que describen las características promedio del camino y la configuración del vehículo. El resultado del paquete se da en unidades monetaria por cada 1000 veh-km. Los datos de entrada sobre la utilización del vehículo y los costos unitarios de los insumos, más que datos actualizados son valores representativos en cada categoría, y vienen incluidos en el paquete computacional.

FREE-FLOW VEHICLE OPERATING COSTS MODEL

Sample Data for Medium Truck

Input Data Report

Roadway Characteristics

	Code: 1-Paved	0-Unpaved	1
Surface type			
Average roughness (IRI)	m/km		2.50
Average positive gradient	%		3.00
Average negative gradient	%		6.00
Proportion of uphill travel	%		50.00
Average horizontal curvature	deg/km		350.00
Average superelevation	fraction		0.04
Altitude of terrain	m		0.00
Effective number of lanes	Code:1-One	0-More than one	0

Medium truck

Vehicle Characteristics

Tare weight	kg	5400.00
Load carried	kg	11000.00
Maximum used driving power	metric HP	100.00
Maximum used braking power	metric HP	250.00
Desired speed	km/hour	88.80
Aerodynamic drag coefficient	dimensionless	0.85
Projected frontal area	m ²	5.20
Calibrated engine speed	rpm	1800.00
Energy-efficiency factor	dimensionless	1.00
Fuel adjustment factor	dimensionless	1.15

Tire Wear Data

Number of tires per vehicle	#	6.00
Wearable volume of rubber per tire	dm ³	7.60
Retreading cost per new tire cost	fraction	0.15
Maximum number of recaps	dimensionless	2.39
Constant term of tread wear model	dm ³ /m	0.16

Wear coefficient of tread wear model	10E-3 dm ³ /kj	12.78
Vehicle Utilization Data		
Average annual utilization	km	50000.00
Average annual utilization	hours	2000.00
Hourly utilization ratio	fraction	0.85
Average service life	years	8.00
Use constant service life ?	Code: 1-Yes 0-No	0
Age of vehicle in kilometers	km	200000.00
Passengers per vehicle	#	1.00
Unit Costs		
New vehicle price	\$	30000.00
Fuel cost	\$/liter	0.30
Lubricants cost	\$/liter	1.50
New Tire cost	\$/tire	220.00
Crew time cost	\$/hour	2.50
Passenger delay cost	\$/hour	0.25
Maintenance labor cost	\$/hour	1.50
Cargo delay cost	\$/hour	0.00
Annual interest rate	%	12.00
Overhead per vehicle-km	\$	0.02

FREE-FLOW VEHICLE OPERATING COSTS MODEL

Sample Data for Medium Truck

___ Results Report _____

Roadway Characteristics			
Surface type	Code: 1-Paved 0-Unpaved	1	
Average roughness (IRI)	m/km	2.50	
Average positive gradient	%	3.00	
Average negative gradient	%	6.00	
Proportion of uphill travel	%	50.00	
Average horizontal curvature	deg/km	350.00	
Average superelevation	fraction	0.04	
Altitude of terrain	m	0.00	
Effective number of lanes	Code:1-One 0-More than one	0	

Medium truck

Unit Costs		
New vehicle price	\$	30000.00
Fuel cost	\$/liter	0.30
Lubricants cost	\$/liter	1.50
New Tire cost	\$/tire	220.00
Crew time cost	\$/hour	2.50
Passenger delay cost	\$/hour	0.25
Maintenance labor cost	\$/hour	1.50
Cargo delay cost	\$/hour	0.00
Annual interest rate	%	12.00
Overhead per vehicle-km	\$	0.02

Vehicle Speed	km/hr	42.97
---------------	-------	-------

Physical Quantities per 1000 vehicle-km

Fuel consumption	liters	429.18	
Lubricants consumption	liters	3.45	
Tire wear	# of equivalent new tires	0.36	
Crew time	hours	23.27	
Passenger time	hours	23.27	
Cargo holding	hours	23.27	
Maintenance labor	hours	7.59	
Maintenance parts	% of new vehicle price	0.13	
Depreciation	% of new vehicle price	0.19	
Interest	% of new vehicle price	0.08	
Total VOC per 1000 vehicle-km	\$	426.64	100.0 %
Fuel	\$	128.75	30.2 %
Lubricants	\$	5.17	1.2 %
Tires	\$	79.94	18.7 %
Crew time	\$	58.18	13.6 %
Passenger time	\$	5.82	1.4 %
Cargo holding	\$	0.00	0.0 %
Maintenance labor	\$	11.39	2.7 %
Maintenance parts	\$	38.02	8.9 %
Depreciation	\$	56.17	13.2 %
Interest	\$	23.20	5.4 %
Overhead	\$	20.00	4.7 %

Anexo B. Reporte del HDM-VOC v 4.0. Camión tipo T3-S2

Este reporte describe el movimiento de un camión tipo T3S2, de 44 t de PBV y carga completa de 25 t. Los costos unitarios están en pesos de 2001, tal como se reporta en el estudio de Arroyo y Aguerrebere (2002).

FREE-FLOW VEHICLE OPERATING COSTS MODEL

*** MEXICAN TYPE T3S2. UNIT COSTS 2001 ***

Results Report			
Roadway Characteristics			
	Code: 1-Paved	0-Unpaved	1
Surface type			
Average roughness (IRI)	m/km		2.50
Average positive gradient	%		3.00
Average negative gradient	%		3.00
Proportion of uphill travel	%		50.00
Average horizontal curvature	deg/km		100.00
Average superelevation	fraction		0.01
Altitude of terrain	m		1000.00
Effective number of lanes	Code:1-One	0-More than one	0

Articulated truck

Unit Costs		
New vehicle price	\$	863364.19
Fuel cost	\$/liter	3.79
Lubricants cost	\$/liter	11.32
New Tire cost	\$/tire	1361.70
Crew time cost	\$/hour	44.38
Passenger delay cost	\$/hour	0.00
Maintenance labor cost	\$/hour	31.07
Cargo delay cost	\$/hour	67.86
Annual interest rate	%	10.00
Overhead per vehicle-km	\$	0.69

Vehicle Speed	km/hr	58.74
---------------	-------	-------

Physical Quantities per 1000 vehicle-km		
Fuel consumption	liters	603.44
Lubricants consumption	liters	5.53
Tire wear	# of equivalent new tires	0.68
Crew time	hours	17.02
Passenger time	hours	0.00
Cargo holding	hours	17.02
Maintenance labor	hours	31.60
Maintenance parts	% of new vehicle price	0.29
Depreciation	% of new vehicle price	0.07
Interest	% of new vehicle price	0.03

Total VOC per 1000 vehicle-km	\$	10267.97	100.0 %
Fuel	\$	2287.03	22.3 %
Lubricants	\$	62.57	0.6 %
Tires	\$	920.64	9.0 %
Crew time	\$	755.52	7.4 %
Passenger time	\$	0.00	0.0 %
Cargo holding	\$	1155.24	11.3 %
Maintenance labor	\$	981.89	9.6 %
Maintenance parts	\$	2527.74	24.6 %
Depreciation	\$	635.96	6.2 %
Interest	\$	254.39	2.5 %
Overhead	\$	687.00	6.7 %

Anexo C. Tabla de sensibilidad de costo en el HDM-VOC v 4.0. Camión tipo T3-S2

Este reporte describe la sensibilidad de costos para un camión tipo T3S2, de 44 t de PBV, al cambiar la carga útil de 25.000 kg (dentro de reglamento) a 75.000 kg (sobrecarga), en pasos de 2.500 kg. La tabla muestra los porcentajes de las componentes del costo dentro del monto total para cada nivel de toneladas transportado. La reducción de la velocidad, así como el aumento tanto en el costo total (*TOTAL VOC \$*) como en las proporciones de los conceptos de retención de la carga (*CARG*) y el salario de los operarios (*CREW*) se notan claramente en la tabla.

FREE-FLOW VEHICLE OPERATING COSTS MODEL version 4.0
 *** MEXICAN TYPE T3S2. UNIT COSTS 2001 ***

Sensitivity Table

Variable : Load carried kg
 Minimum value: 25000
 Maximum value: 75000
 Interval : 2500
 Comparison : 25000

Cost Breakdown by Percentage and Total VOC per 1000 vehicle-km

VARIABLE	FUEL %	LUBR %	TIRE %	CREW %	PASS %	CARG %	M.L. %	M.P. %	DEPR %	INTE %	OVER %	TOTAL VOC (\$)	SPEED km/h	C %
25000	22.3	0.6	9	7.4	0	11.3	9.6	24.6	6.2	2.5	6.7	10268	59	0
27500	22.9	0.6	9	7.4	0	11.4	9.3	24	6.2	2.5	6.5	10523.6	57	2
30000	23.5	0.6	9.1	7.5	0	11.5	9.1	23.4	6.3	2.5	6.4	10782.9	55	5
32500	24.1	0.6	9.2	7.6	0	11.7	8.9	22.9	6.3	2.5	6.2	11045.6	53	8
35000	24.7	0.6	9.3	7.7	0	11.8	8.7	22.3	6.4	2.5	6.1	11311.6	51	10
37500	25.2	0.5	9.3	7.8	0	11.9	8.5	21.8	6.4	2.6	5.9	11580.9	49	13
40000	25.7	0.5	9.4	7.9	0	12.1	8.3	21.3	6.5	2.6	5.8	11853.5	47	15
42500	26.2	0.5	9.4	8	0	12.2	8.1	20.8	6.5	2.6	5.7	12129.5	46	18
45000	26.6	0.5	9.5	8.1	0	12.3	7.9	20.4	6.6	2.6	5.5	12409.3	44	21
47500	27	0.5	9.6	8.2	0	12.5	7.7	19.9	6.6	2.6	5.4	12693.1	43	24
50000	27.4	0.5	9.6	8.2	0	12.6	7.6	19.5	6.7	2.7	5.3	12981.5	41	26
52500	27.8	0.5	9.6	8.3	0	12.8	7.4	19	6.7	2.7	5.2	13275.2	40	29
55000	28.1	0.5	9.7	8.4	0	12.9	7.2	18.6	6.8	2.7	5.1	13575.2	39	32
57500	28.4	0.5	9.7	8.5	0	13.1	7.1	18.2	6.8	2.7	4.9	13882.8	37	35
60000	28.7	0.4	9.7	8.7	0	13.2	6.9	17.8	6.9	2.8	4.8	14199.9	36	38
62500	29	0.4	9.8	8.8	0	13.4	6.8	17.4	7	2.8	4.7	14529.4	35	42
65000	29.2	0.4	9.8	8.9	0	13.6	6.6	17	7.1	2.8	4.6	14875.3	33	45
67500	29.3	0.4	9.8	9.1	0	13.9	6.4	16.6	7.2	2.9	4.5	15244.3	32	48
70000	29.4	0.4	9.7	9.3	0	14.2	6.3	16.2	7.3	2.9	4.4	15647.5	31	52
72500	29.4	0.4	9.7	9.5	0	14.6	6.1	15.7	7.4	3	4.3	16105.2	29	57
75000	29.2	0.4	9.6	9.9	0	15.1	5.9	15.2	7.7	3.1	4.1	16660.8	27	62

FUEL= Fuel consumption
 LUBR = Lubricants consumption
 TIRE = Tyre wear
 CREW = Crew time
 PASS = Passenger time
 CARG = Cargo holding
 M.L. = Maintenance labour
 M.P. = Maintenance parts
 DEPR = Depreciation
 INTE = Interest
 OVER = Overhead
 C = Comparison value

Bibliografía

- Abbas, K.A., y Bell, M.G.H. (1994). System dynamics applicability to transportation modelling. *Transportation Research A*. Vol. 28A. No. 5, pp. 373-400.
- Addis, R.R. y 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. (2000). *HVF – in concrete terms. The Heavy Vehicle Fee/HVF: Backgrounds-Fees-Recommendations-Alternatives*. [online]. Administration Fédérale des Douanes, Impôts et Redevances (AFD), RPLP. Disponible en: <URL: <http://www.customs.admin.ch/e/firmen/steuern/lsva/konkret/konkret.php>> [Consultado en Feb/ 2003].
- 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 y Tweddle, 1988, p.16-17).
- Archondo-Callao, R.S. y Faiz, A. (1994). *Estimating Vehicle Operating Costs*. World Bank Technical Paper No. 234. Washington, D.C.
- Arroyo-O, J.A. y 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.
- Bell, M.G.H. e lida, Y. (1997). *Transportation Network Analysis*. John Wiley & Sons. Chichester, pp. 193-204.
- Benekohal, RF; El-Zohairy, YM; Forrler, E; Aycin, MF. (1999). Truck delay and traffic conflicts around weigh stations. *Transportation Research Record*. No. 1653, pp. 52-60.
- Borowski, E.J. y Borwein, J.M. (1989). *Collins Dictionary of Mathematics*. Harper Collins Publishers. UK.
- Bosch, R. (2000). *Automotive Handbook*. 5th 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> [Consultado en Feb/ 2003].
- Casavant, K.L. y 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> . [Consultado en Abr/ 2003].

Checkland, P. y 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. y 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>. [Consultado en Feb/ 2004].

Durán, G., Gutiérrez, J.L. y 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. e 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>. [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 >. [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. y 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/ 2001]

Gutiérrez, J.L; Mendoza, A. y 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. y 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. y 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. y 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. y 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>. [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. y Mailaender. (1999). *Highway design and traffic safety engineering handbook*. McGraw-Hill. USA, pp. 13.1- 13.3.

Levins, C. y 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](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*. 32nd edition. Kogan Page Ltd. London, p.285-286.

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

Rascón, O., Barousse, M. y 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. y 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. y 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. y 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. y Winston, C. (1988). Optimal highway durability. *The American economic review*. Vol. 78. No. 3. pp. 560-569.
- Small, K.A., Winston, C. y Evans, C.A. (1989). *Road work. A new highway pricing and investment policy*. The Brookings Institution. Washington, D.C., pp. 9-13.
- 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](http://www.embamexcan.com/english/economy/NAFTA.html)> [Consultado en Feb/ 2001].
- Taylor, B., Bergan, A. y 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](http://tmip.fhwa.dot.gov/clearinghouse/docs/quick/index.stm)>. [Consultado en Abr/ 2001].
- 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. y 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. y 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. y 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. y 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)**

§ **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)**

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
publicaciones@imt.mx