



ANALISIS DE COSTOS DE OPERACION VEHICULAR DEL AUTOTRANSPORTE DE CARGA POR LA RED CARRETERA FEDERAL

*Daniel Pérez Bello
Alberto Mendoza Díaz
Antonio García Chávez
Noelia Villegas Villegas*

**Publicación Técnica No.179
Sanfandila, Qro. 2001**

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

**Análisis de Costos de
Operación Vehicular del
Autotransporte de Carga por
la Red Carretera Federal**

**Publicación Técnica No.179
Sanfandila, Qro. 2001**

Este documento fue elaborado en la Coordinación de Seguridad y Operación del Transporte, por Daniel Pérez Bello¹, Alberto Mendoza Díaz, Antonio García Chávez y Noelia Villegas Villegas . Se contó con la colaboración de Emilio Mayoral Grajeda en la edición de este documento.

¹ Pasante de la Maestría en Vías Terrestres de la Universidad Autónoma de Chihuahua.

Indice

| | |
|--|------------|
| Resumen | VII |
| Abstract | IX |
| Resumen Ejecutivo | XI |
| 1 Introducción | 1 |
| 1.1 Descripción del Problema | 1 |
| 1.2 Información Preliminar | 2 |
| 1.3 Justificación | 4 |
| 1.4 Fundamentación Teórica | 4 |
| 1.5 Objetivos | 5 |
| 1.6 Hipótesis | 6 |
| 1.7 Metodología | 6 |
| 1.8 Utilidad del Proyecto | 7 |
| 2 Antecedentes | 9 |
| 2.1 Sistemas de Información Geográfica y de Posicionamiento Global | 9 |
| 2.2 Sistemas de Información Geoestadística para el Transporte | 11 |
| 2.3 El Sistema “ArcView” | 13 |
| 2.4 Bases de Datos | 13 |
| 2.4.1 Aforos con Clasificación Vehicular | 13 |
| 2.4.2 Capacidad y Niveles de Servicio | 14 |
| 2.4.3 Tipo de Terreno | 14 |
| 2.4.4 Estado del Pavimento | 15 |
| 2.4.5 Curvatura | 15 |
| 2.4.6 Cuotas | 15 |
| | V |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.5 | Metodología para el Cálculo de Costos de Operación Vehicular (COV's) | 19 |
| 3 | Desarrollo del Sistema | 21 |
| 3.1 | Enfoque | 21 |
| 3.2 | Información Cartográfica | 21 |
| 3.3 | Integración de Bases de Datos | 27 |
| 3.3.1 | Aforos con Clasificación Vehicular | 27 |
| 3.3.2 | Capacidad y Niveles de Servicio | 28 |
| 3.3.3 | Tipo de Terreno | 28 |
| 3.3.4 | Estado del Pavimento | 28 |
| 3.3.5 | Curvatura | 28 |
| 3.3.6 | Cuotas | 29 |
| 3.3.7 | Límite de Velocidad | 29 |
| 3.4 | Incorporación de Costos de Operación Vehicular | 29 |
| 4 | Generación de Algunos Resultados | 40 |
| 4.1 | Obtenidos Directamente de los Datos Integrados al Sistema | 40 |
| 4.1.1 | Aforos con Clasificación Vehicular | 40 |
| 4.1.2 | Vehículos-Kilómetro | 42 |
| 4.1.3 | Capacidad y Niveles de Servicio | 44 |
| 4.2 | Otros Resultados a Partir de Procesos más Elaborados | 49 |
| 4.2.1 | COV Totales del Flujo de Vehículos de Carga y por Toneladas-Kilómetro | 49 |
| 4.2.2 | Identificación de Corredores Prioritarios para Modernización | 52 |
| 5 | Conclusiones | 61 |
| 5.1 | Conclusiones | 61 |
| 5.2 | Recomendaciones | 62 |
| | Referencias | 63 |

Resumen

El presente trabajo tiene por objetivo integrar datos en formatos electrónicos y no electrónicos, actualmente dispersos, en un ambiente que permita, de manera ágil, la visualización y combinación de los datos para el cálculo y análisis de los Costos de Operación Vehicular del autotransporte de carga de la Red Carretera Federal y con éstos, la selección de rutas óptimas en el traslado de las mercancías.

Actualmente, gran parte de la información está desagregada por estado. Con este trabajo, se podrá manejar toda la Red en un solo archivo o proyecto. La información con que se alimenta a dicho proyecto puede clasificarse en: (I) información cartográfica, (II) información de las condiciones físicas de las carreteras y los volúmenes de tránsito que circulan en ellas, y (III) Costos de Operación Vehicular.

El contar con tan diversas fuentes de información, hace necesario establecer un sistema que permita el acceso de ésta en forma desagregada, así como la utilización de herramientas computacionales adecuadas que hagan posible configurar la red de forma integral, permitiendo al mismo tiempo un grado de segmentación que facilite la alimentación de información detallada al sistema.

En el desarrollo de este sistema, se integraron referencias cartográficas, bases de datos existentes conteniendo aforos con clasificación vehicular, capacidad y niveles de servicio, tipo de terreno, estado del pavimento, curvatura y cuotas. Esta integración fue posible gracias al uso de la herramienta computacional ArcView y su módulo de análisis de redes, cuyos atributos y ventajas son descritos en el desarrollo del trabajo.

Una vez integrada la información anteriormente descrita, se procedió al cálculo y análisis de los Costos de Operación Vehicular, con los que también se alimentó al sistema para así estudiar las rutas más económicas y seguras para el transporte de productos.

Finalmente, en la generación de algunos resultados obtenidos a partir de los datos integrados y con procesos más elaborados, se establecieron los principios más convenientes para la identificación de los corredores de transporte prioritarios para el autotransporte federal de carga a ser modernizados en el futuro cercano.

Abstract

This work is aimed at integrating electronic and non-electronic data, currently dispersed in many different places, into a Geographic Information System (GIS) thus making possible the efficient management of such information as well as the computation of vehicle operation costs (VOC) of freight road motor transport through the Mexican Federal Road Network and the selection of the optimal routes for the road transport of commodities.

In the past, most of the former information has been handled separately by state. This work will make it possible to integrally manage the information for all the states in just one project. The project is fed with the following types of data: (I) cartographic information, (II) physical and operational characteristics of the roads, and (III) vehicle operating costs. The project or system is developed in the GIS named ArcView.

Finally, with basis on the developed system and the ArcView Network Analyst, a series of criteria for identification of the primary road corridors for the transport of merchandise within the country are studied. From this study, recommendations are generated for identifying the most convenient corridors to be modernized in the near future.

Resumen Ejecutivo

Hoy día, la apertura comercial internacional de México y otros factores hacen importante mejorar la gestión de los sistemas de transporte del país, particularmente el de la Red Carretera, por ser éste el modo que más contribuye al movimiento nacional de pasajeros y carga. La complejidad de las redes actuales de transporte hace necesario que la información sobre sus aspectos operativos, tenga que ser manejada a través de sistemas de cómputo. En el caso de la Red Carretera Federal, los datos de magnitud de los flujos de tránsito, las características y situación que guarda cada tramo, los Costos de Operación Vehicular (COV's) y otros datos, son fundamentales para la planeación del desarrollo de la Red y los servicios de transporte que por ella se efectúan. Los sistemas de manejo y procesamiento de bases de datos así como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), ambos de desarrollo reciente acelerado, representan herramientas para el logro de los fines anteriores.

El objetivo de este trabajo es integrar datos en formatos electrónicos y no electrónicos, actualmente dispersos, en un ambiente que permita de manera ágil, la visualización y combinación de los datos para el cálculo y análisis de los Costos de Operación Vehicular del autotransporte de carga de la Red Carretera Federal y con éstos, la selección de rutas óptimas en el traslado de las mercancías.

Actualmente, gran parte de la información está desagregada por estado. Con este trabajo, se podrá manejar toda la Red en un solo archivo o proyecto. La información con que se alimentará a dicho proyecto puede clasificarse en:

- Información cartográfica.
- Información de las condiciones físicas de las carreteras y los volúmenes de tránsito que circulan en ellas.
- Costos de Operación Vehicular.

El contar con tan diversas fuentes de información, hace necesario establecer un sistema que permita el acceso de ésta, en forma desagregada. Así, el primer paso es la utilización de herramientas computacionales adecuadas, que hacen posible configurar la red de forma

integral permitiendo al mismo tiempo un grado de segmentación que facilite la alimentación de información detallada al sistema.

En el desarrollo de este sistema, se integraron referencias cartográficas, bases de datos existentes conteniendo aforos con clasificación vehicular, capacidad y niveles de servicio, tipo de terreno, estado del pavimento, curvatura y cuotas. Esta integración fue posible gracias al uso de la herramienta computacional ArcView y su módulo de análisis de redes, cuyos atributos y ventajas son descritos en el desarrollo del trabajo.

Una vez integrada la información anteriormente descrita, se procedió al cálculo y análisis de los Costos de Operación Vehicular, con los que también se alimentó al sistema, para así estudiar las rutas más económicas y seguras para el transporte de productos.

Finalmente, se generaron algunos resultados obtenidos a partir de los datos integrados y con procesos más elaborados. En el primer caso, estos resultados son presentados en vistas o representaciones geográficas en ArcView, obtenidos directamente con los datos integrados al sistema (Transito Promedio Diario Anual, Vehiculos-Kilómetro, Capacidad y Niveles de Servicio, Tipo de Terreno, Estado Superficial del Pavimento y Curvatura). En el caso de los procesos más elaborados, se utilizaron los COV's totales del flujo de vehículos de carga y por tonelada-kilómetro transportadas y se analizaron varios criterios de identificación de los corredores de transporte prioritarios para el autotransporte federal de carga a ser modernizados en el futuro cercano.

1 Introducción

1.1 Descripción del Problema

A través de los años, se han venido generando diferentes tipos de información utilizados en la gestión de la Red Carretera Federal, tales como: (I) los aforos con clasificación vehicular recabados desde hace más de 30 años en numerosos sitios de la Red, (II) diversos indicadores para calificar el estado de los diferentes elementos de la sección transversal de los arcos (p. ej. nivel de servicio del pavimento, estado del señalamiento, etc.), el nivel de saturación de los arcos, etc. También, como resultado de levantamientos topográficos, se han obtenido planos con los alineamientos de los caminos.

El proceso anterior ha traído como consecuencia que actualmente se tenga una diversidad de archivos, generalmente dispersos (en diferentes sitios u organizaciones) y en papel (es decir, no en archivos electrónicos), lo cual hace prácticamente imposible su utilización integral y automatizada.

Con el fin de contribuir a resolver este problema, se realiza este trabajo, el cual vacía varios de los archivos anteriores (sobre alineamientos, aforos, etc.) en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Como resultado de esta acción, se genera un sistema que hace más expedita la explotación de los distintos tipos de información para diversos fines. Se vacían en el sistema siguientes datos para cada tramo de la Red considerada: aforo, composición vehicular, capacidad, pendiente, curvatura, calidad de rodamiento del pavimento y costos de operación vehicular (COV's) (Referencia 1). Estos últimos corresponden al autotransporte de carga, particularmente a la configuración T3-S2 (a plena carga) la cual juega un papel primordial en el autotransporte doméstico e internacional de mercancías de México (Referencia 1). Los COV's integrados en el sistema, son calculados utilizando el programa VOC del Banco Mundial (Referencia 2). La información que se maneja en este trabajo corresponde básicamente al año 2000.

La Red a considerar en este trabajo es la Red Federal libre (pavimentada) más las autopistas de cuota, ya sean las de jurisdicción de Caminos y Puentes Federales (CAPUFE), o del Banco Nacional de Obras y Servicios (BANOBRAS), u otras concesionadas. Esta Red total tiene una longitud aproximada de 48,470 kilómetros (42,478 km de Red Federal libre, 1,507

km de autopistas de CAPUFE, 2,813.4 km de autopistas de BANOBRAS y 1,671.6 km de otras autopistas concesionadas).

1.2 Información Preliminar

La información preliminar más relevantes para el desarrollo de este trabajo es la referente a: (I) el SIG en el que se realizan la mayoría de los desarrollos de este trabajo, y (II) los archivos o inventarios a partir de los cuales se toma la información de la Red Carretera Federal. A continuación se describen algunos aspectos importantes en relación con estos dos tipos de información:

- Con la reciente tecnología, se cuenta actualmente con herramientas que facilitan las tareas de manejo, análisis y administración de datos, tales como los sistemas geográficos de información (GIS). Estos permiten:
 - a) Relacionar datos espaciales (vinculados con una ubicación de acuerdo a un sistema de coordenadas) con no-espaciales.
 - b) Organizar y combinar la información proveniente de distintas fuentes a través de capas.
 - c) Representar y analizar geográficamente los datos.
 - d) Automatizar el manejo de la información.

Para el desarrollo de este trabajo se seleccionó el SIG denominado ArcView (Referencia 3), atendiendo a consideraciones de capacidad contra precio. Así mismo se utiliza la extensión de ArcView para el análisis de problemas de redes (Referencia 4). Como herramientas auxiliares de ArcView y su módulo de redes, en este trabajo también se utilizan manejadores de bases de datos y hojas de cálculo.

- Dentro de los archivos o inventarios de información que se utilizan, se considera que el más importante es el Sistema de Información GeoEstadística para el Transporte (SIGET) (Referencia 5). Este es un inventario georeferenciado de la infraestructura de transporte del país (carreteras, puertos, etc.) en el que se detallan, entre otros aspectos, las características de la Red Carretera Federal (alineamiento vertical y horizontal, gasolineras y estaciones de servicio, etc.). Este inventario

ha venido siendo levantado por los Centros de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (Centros SCT) en los Estados utilizando Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), bajo la dirección del IMT. Este, además, ha realizado el análisis y desarrollo de la información levantada. Aunque el SIGET se ha manejado tradicionalmente en el GIS denominado ArcInfo, como ya se indicó, para esta aplicación se seleccionó ArcView. Como ya también se mencionó, se utilizan diferentes tipos de información sobre características físicas y operativas de la Red (aforos con clasificación vehicular, nivel de servicio de los pavimentos, etc.), los cuales se obtienen a partir de los organismos del Gobierno Federal que los generan.

- Los COV's integrados en sistema provienen del paquete de cómputo denominado Costos de Operación Vehicular (VOC por sus siglas en inglés) (Referencia 2). Este paquete fue elaborado por el Banco Mundial, con el fin de proporcionar a los planeadores una herramienta para la generación de información de dichos costos que pudiese contribuir a una mejor evaluación técnico-económica de sus opciones de inversión. Con base en estudios realizados en diversos países, varios de ellos con sistema de transporte carretero con condiciones similares al de México (por ejemplo Brasil), se construyeron una serie de modelos matemáticos para diferentes tipos de vehículos (desde automóviles hasta camiones de pasajeros y carga) con los que el Banco Mundial estructuró posteriormente este programa de cómputo. Algunos de los modelos generados, son: (I) de consumo de combustibles, (II) de consumo de lubricantes, (III) de consumo de llantas, (IV) de salario de tripulantes, (V) de mantenimiento vehicular (incluyendo mano de obra y refacciones), (VI) de depreciación del vehículo, (VII) de costos financieros, (VIII) de costo de oportunidad del tiempo invertido en viajar por los pasajeros y la carga transportados, etc. Varios de los modelos anteriores generan consumos, ingresados por el usuario del programa. Para un vehículo deseado determinado (especificado por el usuario), el programa genera, entre otras salidas, los estimados de los consumos mencionados, así como el costo total por kilómetro de operación y la distribución porcentual de los diferentes conceptos que lo componen.

1.3 Justificación

El desarrollo de este trabajo se justifica por las siguientes razones:

- Con la finalidad de generar un sistema de administración de distintos tipos de información de la Red Carretera Federal en el ambiente de un SIG (incluyendo costos operativos del autotransporte de carga), que permita su ágil consulta y explotación.
- Como una etapa que forma parte del desarrollo de proyectos de investigación de mayores alcances, tales como la elaboración de modelos de asignación del tráfico de carga por la por la Red Carretera Federal.

1.4 Fundamentación Teórica

Los fundamentos teóricos para este trabajo, son:

- En el momento presente, la apertura comercial internacional de México y otros factores hacen importante mejorar la gestión de los sistemas de transporte del país, particularmente el de la Red Carretera, por ser éste el modo que más contribuye al movimiento nacional de pasajeros y carga. La complejidad de las redes actuales de transporte hace necesario que la información sobre sus aspectos operativos, tenga que ser manejada a través de sistemas de cómputo. En el caso de la Red Carretera Federal, los datos de magnitud de los flujos de tránsito, las características y situación que guarda cada tramo, COV's y otros datos, son fundamentales para la planeación del desarrollo de la Red y los servicios de transporte que por ella se efectúan. Los sistemas de manejo y procesamiento de bases de datos así como los SIG, ambos de desarrollo reciente acelerado, representan herramientas para el logro de los fines anteriores.
- La tecnología computacional ofrece actualmente una herramienta diseñada específicamente para facilitar y apoyar las tareas de manejo, análisis espacial y administración de información, conocida como Sistemas de Información Geográfica (SIG). Las capacidades de los

SIG, ya mencionadas, hacen idónea su aplicación para la realización de este trabajo.

- En el SIGET, la información de la Red Carretera Federal levantada con GPS está organizada por Estados de la República, dado que se ha adoptado la política de proporcionar a cada Estado su información para sus propios fines (es decir, que su uso se realice de manera descentralizada). Así mismo, es más ágil manejar la información total en 32 archivos en vez de toda ella en uno solo. En este trabajo, se aborda el problema de integrar y manejar la información de toda la Red en un solo archivo (o proyecto), basándose en la segmentación de la Red a nivel de los tramos considerados por el sistema de clasificación de Carreteras Federales de la SCT (Referencia 6). Lo anterior se efectúa utilizando SIG's, que son instrumentos técnicos con diversas capacidades, diseñados para inventariar, administrar y manejar información espacial y no espacial.
- La información de COV's del autotransporte de carga, evaluada utilizando las características físicas de la infraestructura en el SIGET y manejada en el ambiente de un SIG, permite generar una gran diversidad de análisis de alta precisión tales como la determinación del COV total para determinadas rutas, la evaluación de la Red bajo diferentes criterios, etc.

1.5 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es elaborar un SIG que permita evaluar los COV's del autotransporte de carga por los tramos de la Red Carretera Federal a partir de sus características físicas y operativas, con el fin de facilitar el desarrollo de medidas pertinentes de explotación, administración o gestión de la Red.

Así mismo, se contemplan los siguientes objetivos particulares:

- Dominar el uso de un SIG.
- Diseñar un sistema de manejo de información de la Red Carretera Federal, incluyendo COV's del autotransporte de carga, tomando como

base el inventario de infraestructura con que ya se cuenta dentro del SIGET.

- Llevar a cabo el desarrollo del sistema anterior.
- Realizar algunas aplicaciones del sistema antes mencionado (generación de representaciones, determinación de rutas óptimas, evaluación y rediseño de la Red, etc.).

1.6 Hipótesis

Se propone la hipótesis de que es posible a través de ArcView, consultar y analizar las condiciones que guardan los diferentes tramos de la Red Carretera Federal, en términos de los datos operativos que se consideran (aforo, composición vehicular, costos operativos, etc.). También se asume que este enfoque facilita el desarrollo de medidas de gestión de la Red.

1.7 Metodología

La metodología y los alcances están contenidos en las siguientes partes que constituyen este trabajo:

- Inicialmente se desarrolla una introducción que describe información preliminar, objetivos y alcances del trabajo.
- En el Capítulo 2 se describen con detalle algunos antecedentes relevantes, tales como: (I) el Sistema de Información GeoEstadística para el Transporte (SIGET), que es la plataforma de referencia sobre la que se realiza este trabajo y que contiene, en coberturas de ArcInfo, la georeferenciación de la Red Carretera Nacional y cuya base cartográfica, en lo referente a los límites estatales y cabeceras municipales, proviene del INEGI; (II) el programa computacional ArcView, que se utiliza para el desarrollo del sistema planteado y que también se tiene disponible en el IMT; (III) los datos que se manejan de la Red, incluyendo, para cada tramo: alineamientos, capacidad y niveles de servicio, longitud, aforos con clasificación vehicular, estado de la superficie de rodamiento, cuota (sólo en autopistas de cuota) y tipo de terreno (plano, lomerío o montañoso); y (IV) el programa VOC que se utiliza para el cálculo de COV's del autotransporte de carga.

- El Capítulo 3 describe detalladamente el desarrollo del sistema. Este paso consiste en:
 - a) Preparar la Red para que pueda ser utilizada por ArcView y su extensión para el análisis de redes.
 - b) Vaciar en la Red segmentada y preparada, los distintos datos básicos a considerar.
 - c) Integrar en el sistema, para cada sentido de cada tramo, el COV del autotransporte de carga.
- En el Capítulo 4 se generan algunas aplicaciones y resultados obtenidos a partir del sistema desarrollado.
- Finalmente se presentan una serie de conclusiones y recomendaciones.

Los alcances de este trabajo están limitados por las posibilidades que brinda el SIG denominado ArcView y su módulo para el análisis de redes, los rasgos geográficos de la Red contenidos dentro del SIGET, los otros sistemas computacionales que se utilizan (p. ej. Visual Fox Pro, etc.), los datos para toda la Red bajo estudio (clasificación y nomenclatura de las carreteras, aforo, composición vehicular, nivel de servicio y los COV's del autotransporte de carga para cada tramo). Se reitera que este trabajo se refiere a la Red Carretera Federal pavimentada, es decir, excluye fundamentalmente carreteras no pavimentadas y estatales.

1.8 Utilidad del Proyecto

Este trabajo resulta ser una herramienta útil con provecho estimado en función de criterios como ahorro de tiempo, facilidad de manejo y efectividad de los procesos, en relación con el análisis de información de la Red.

- Cuenta con información confiable, permitiendo obtener una perspectiva de las características que guarda cada tramo de la Red Carretera Federal.
- Apoya las labores de planeación, investigación y toma de decisiones por parte del Sector Transporte.

- Genera información de utilidad para los administradores y operadores de la infraestructura.
- Permite al autotransporte de carga, el conocimiento de sus costos operativos como apoyo para la programación de sus actividades.

2 Antecedentes

Como se indicó en la introducción, los antecedentes que se presentan a continuación se refieren a los sistemas de información geográfica (SIG) y de posicionamiento global (GPS), el Sistema GeoEstadístico para el Transporte (SIGET), el programa computacional denominado ArcView, las bases de datos que son insumo para el desarrollo del sistema que es objeto de este trabajo y la metodología que se utiliza para el cálculo de costos de operación vehicular.

2.1 Sistemas de Información Geográfica y de Posicionamiento Global

Hoy en día, en diversos países, se tiene la necesidad de desarrollar un sistema de base de datos georeferenciados y Sistemas Geográficos de Información (SIG), para lograr lo anterior, los gobiernos de estos países y las diversas organizaciones invierten grandes cantidades de dinero. Hace unos cuantos años, los SIG eran herramientas muy especializadas sólo al alcance de pocas organizaciones, hoy en día, estas herramientas son utilizadas por un mayor número de usuarios. Lo anterior puede tener varias explicaciones, de las cuales podemos mencionar:

- Los costos de los equipos informáticos son muy accesibles.
- La geografía y los datos que sirven para cuantificarla forman parte ya de nuestro mundo cotidiano; la mayoría de las decisiones que tomamos diariamente están relacionadas con o influenciadas por un hecho geográfico.

Los SIG han demostrado su utilidad práctica en diversas labores en torno al transporte, ya sea mediante estudios experimentales o bien, a través de su plena inserción como herramienta de apoyo en actividades particulares en distintos departamentos y organismos de transporte, principalmente de Estados Unidos y Canadá.

Las diversas posibilidades que ofrecen los SIG en los sistemas de redes del transporte están aún por revelarse, son resultado de las innovaciones tecnológicas que amplían sus expectativas, así como la complejidad de la actividad en la cual se definen condiciones e información múltiple y variada.

Como resultado de la necesidad de manejar información espacial para el estudio y planeación del transporte, que exige alta confiabilidad y exactitud en el manejo de los atributos, en los últimos años se han generado sistemas automáticos más eficientes para la generación, análisis y manipulación de la información geográficamente referenciada. Entre las tecnologías que presentan un mayor desarrollo se encuentran las antes señaladas, los Sistemas Geográficos de Información (SIG) y los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) vía satélite.

El Sistema de Posicionamiento Global es una tecnología de navegación y posicionamiento basado en satélites. El Desarrollo del Navigation Satellite Timing and Ranging (NAVSTAR) Global Positioning System (GPS), nombre completo del sistema, es un programa financiado por el gobierno de los Estados Unidos, y administrado por el Departamento de la Defensa de ese país. El GPS se ha constituido en la herramienta más completa para el registro de la localización de rasgos o elementos sobre la superficie del planeta. A partir de 1993, se completó la puesta en órbita de una constelación de 24 satélites (21 operativos y 3 de reserva) con la misión de transmitir señales con información de diversos parámetros de posicionamiento, que registradas por receptores en tierra permiten calcular, con un alto grado de exactitud, la localización geográfica de cualquier objeto sobre la superficie terrestre (Referencia 7).

La tecnología del GPS, además de ser utilizada para determinar la localización exacta de un lugar sobre la superficie terrestre, proporciona también información sobre tiempo y velocidad que le permite actuar como un sistema para calcular posiciones tridimensionales (latitud, longitud y altitud) de la ubicación de los usuarios.

Los Sistemas Geográficos de Información (SIG) son sistemas diseñados para la captura, almacenamiento y manipulación de la información en donde la ubicación espacial constituye el elemento fundamental. El análisis conjunto derivado de la combinación de información gráfica en forma de mapas (información espacial) y atributos asociados (información no espacial), da a los SIG su particular potencial de aplicación al sistema de transporte.

En otras palabras, los SIG son fundamentalmente instrumentos computacionales de capacidades múltiples, diseñados y habilitados en primera instancia para inventariar información geográfica y de los atributos

que la caracterizan, la cual a su vez alimenta las funciones de análisis con que están equipados, para convertirse en herramientas útiles a las labores de planeación y administración. La clave exacta para emplear un SIG y obtener de él efectividad y resultados satisfactorios, estriba en la identificación acertada de su aplicación la cual deberá tener como característica primordial la necesidad del análisis geográfico (Tabla 2.1) (Referencia 8).

Lo que distingue a un SIG de una base de datos tradicional, es que los atributos de éstos están asociados a un objeto topológico (punto, línea, polígono) y registran una ubicación geográfica precisa. La utilización de relaciones espaciales, propuesta explícitamente por los SIG, agrega un nivel de “inteligencia” a bases de datos.

El uso de GPS para el registro de información georeferenciada, así como el de SIG para el manejo de esa información, proporcionan herramientas que conjuntamente son muy poderosas para las diversas actividades que tienen que ver con la planeación y operación del transporte.

2.2 Sistemas de Información Geoestadística para el Transporte

Una aplicación conjunta de las dos herramientas antes mencionadas (GPS y SIG), es la que realiza el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), el cual desde 1991 inició una línea de investigación tendiente a evaluar dichas tecnologías, desarrollando el proyecto Sistema de Información GeoEstadística para el Transporte (SIGET). Este proyecto se centró en la creación, en formato digital, de bases de datos georeferenciados en coberturas del Sistema Geográfico de Información (SIG) ArcInfo (Referencia 9). El levantamiento fue realizado con GPS, e incluyó el trazo de las redes carreteras pavimentadas, la ubicación de puertos y aeropuertos, así como también la localización precisa de rasgos asociados al camino (p. ej. bancos de materiales, señales, etc.). La importancia del banco de información reside tanto en la precisión en la ubicación de los elementos registrados, como en la gran versatilidad de manejo del formato digital a través del SIG.

Tabla 2.1 **Ventajas que Brinda la Utilización de un SIG a la Planeación, Administración e Investigación en el Sistema de Transporte.**

| | |
|---|--|
| INTEGRACION DE DATOS | Facilidad otorgada por el empleo de un sistema común de referencia, tanto para la información directamente relacionada con las vías de comunicación, como de aquellas otras que hacen posible análisis más amplios (datos demográficos, etc.). |
| REPRESENTACION ESPACIAL DE LOS DATOS | Muestra en forma gráfica (representación cartográfica) la distribución y/o comportamiento de los datos en el territorio, lo cual permite una mayor comprensión del problema en cuestión. |
| ANALISIS INNOVADOR | Ofrece nuevas formas de observar viejos problemas al combinar modelos y proporcionar respuestas a preguntas complejas y multidimensionales en forma rápida. |

2.3 El Sistema “ArcView”

Como ya se mencionó, en este trabajo se busca generar un sistema que haga más expedita la explotación de los distintos tipos de información (alineamientos, aforos, nivel de servicio del pavimento, estado del señalamiento, etc.). Dado que ArcInfo, el SIG en el que se maneja el SIGET, es un sistema muy poderoso pero también muy caro, para el desarrollo de este trabajo se eligió el SIG denominado ArcView (Referencia 3). Este último tiene la ventaja de ser más fácil de utilizar y mucho más barato, que es un factor muy importante a considerar ya que el sistema generado será distribuido a los 32 Centros de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) en los Estados de la República, y además el Instituto Mexicano del Transporte cuenta con esta herramienta. Adicionalmente el ArcView es un SIG compatible con ArcInfo, al ser ambos elaborados por la misma empresa.

ArcView permite sobreponer datos contenidos en distintas capas de información, haciendo análisis combinados de los mismos, representándolos a la escala deseada y permitiendo obtener resultados que ayuden a tomar decisiones y resolver problemas de las redes del transporte. El esfuerzo anterior se llevará a cabo apoyándose también en otros tipos de programas de cómputo, como por ejemplo: Visual FoxPro (Referencia 10), el cual proporciona todas las herramientas necesarias para administrar datos, tanto si se va a organizar tablas de información y ejecutar consultas, como si se va a crear un sistema de bases de datos integral o programar una aplicación para la administración de usuarios finales. Otro de los programas en que se apoya este trabajo es la Hoja de Cálculo Excel (Referencia 11).

2.4 Bases de Datos

2.4.1 Aforos con Clasificación Vehicular

Con el fin de conocer la magnitud de los flujos de tránsito y su composición en términos de los diferentes tipos de vehículos que los integran así como su variación histórica, la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la SCT realiza anualmente conteos de tránsito en una serie de estaciones distribuidas en toda la Red Carretera Federal pavimentada. Como resultado de los conteos efectuados en un año determinado, la DGST publica, al año siguiente, los aforos con clasificación vehicular en toda la

Red recabados en ese año. Esta información se publica a nivel de tramos, según la clasificación de las Carreteras Federales de la misma DGST. Esta es la información que será integrada al sistema desarrollado en esta tesis. Como ya se dijo anteriormente, la información utilizada corresponde al año 2000 (Referencia 12).

2.4.2 Capacidad y Niveles de Servicio

Para la Red bajo estudio, esta información es también generada por la DGST de la SCT, y la publica con determinada periodicidad. Esta información se publica, a nivel de tramos, en el mismo formato que la información de aforos con clasificación vehicular. Para cada tramo se reporta su flujo vehicular horario existente, los flujos evaluados para los niveles de servicio A a E y el nivel de servicio actual. El flujo estimado para el nivel de servicio E es la capacidad en el tramo. En este trabajo, para los diferentes niveles de servicio, se adoptan las definiciones del Manual de Capacidad de Carreteras de los EUA (Referencia 13). La información de capacidad y niveles de servicio que se integrará en el sistema es la que corresponde a 1998 (Referencia 14), por ser la más recientemente publicada por la DGST.

2.4.3 Tipo de Terreno

Este parámetro tiene una influencia determinante en los costos de operación vehicular, por su relación con las pendientes de las carreteras. Por esta razón, hubo de ser integrado al sistema el tipo de terreno sobre el que se encuentra cada tramo de la Red considerada, ya sea plano, lomerío o montañoso. En este trabajo se considera que terreno plano es aquél cuyo promedio de inclinación, en una longitud mínima de 30 kilómetros, es menor de 2%; es lomerío si dicho promedio se encuentra entre 2% y 4%; y montañoso si es mayor que 4%. Para todos los tramos, la información del tipo de terreno fue obtenida de la misma fuente de la DGST que los datos de capacidad y niveles de servicio (Referencia 14).

2.4.4 Estado del Pavimento

Esta información, para cada carretera, fue obtenida para el año de 2000 en términos del Índice Internacional de Rugosidad (IRI por sus siglas en inglés), a partir de la DGST (Referencia 15). El IRI es un índice directamente relacionado con la suma de valores absolutos de las deformaciones superficiales del pavimento por unidad de longitud, que oscila típicamente entre valores de 2 y 15 metros por kilómetro. Los valores de IRI que se utilizan en este trabajo fueron obtenidos empleando el equipo denominado May's Ride Meter (Referencia 16).

2.4.5 Curvatura

El dato de curvatura horizontal que la metodología de cálculo de costos de operación vehicular utilizada en este trabajo emplea, es la suma de los valores absolutos de las deflexiones entre tangentes sucesivas a lo largo del tramo, dividida entre la longitud del tramo. Para cada tramo, este dato fue obtenido del registro en el SIGET del alineamiento horizontal de la Red, según se indica en el capítulo siguiente.

2.4.6 Cuotas

La información de las cuotas cobradas en los puentes y autopistas de cuota del país fue obtenida de las páginas de Internet de los diferentes organismos que tienen a su cargo la administración de las mismas (CAPUFE, BANOBRAS, etc.) (Referencias 17 y 18). La Tabla 2.2 reproduce las cuotas cobradas para 75 carreteras o puentes de cuota para los que se obtuvo esa información. En todos los casos se presenta el nombre de la carretera o puente, su longitud y las cuotas cobradas a automóviles, autobuses y camiones de carga según dos grupos, 4 y 5 ejes así como 6 ó más ejes.

Tabla 2.2 Cuotas en las Autopistas y Puentes del País

| NOMBRE | LONGITUD (KM) | TARIFA AUTOMOVILES | TARIFA AUTOBUSES | TARIFA CAMIONES DE 4 Y 5 EJES | TARIFA CAMIONES DE 6 O MAS EJES |
|--|----------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--|
| GUADALAJARA - TEPIC (CUOTA) | 176.60 | 261 | 314 | 482 | 538 |
| MEXICO - CUERNAVACA (CUOTA) | 61.50 | 70 | 125 | 215 | 315 |
| PUENTE DE IXTLA - IGUALA (CUOTA) | 63.58 | 45 | 85 | 165 | 230 |
| CUERNAVACA - ACAPULCO (CUOTA) | 262.78 | 378 | 538 | 702 | 778 |
| VILLAHERMOSA - CD. DEL CARMEN (PUENTE) | 5.07 | 53 | 106 | 170 | 229 |
| KANTUNIL - CANCUN (CUOTA) | 263.24 | 230 | 440 | 955 | 1270 |
| SONOYTA - MEXICALI (PUENTE) | 0.79 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| MONTERREY - REYNOSA (LIBRE) (PUENTE) | 2.70 | 18 | 35 | 35 | 35 |
| VILLAHERMOSA - FCO. ESCARCEGA (PUENTE) | 2.76 | 16 | 30 | 59 | 85 |
| IRAPUATO - GUADALAJARA (PUENTE) | 3.13 | 9 | 14 | 21 | 34 |
| ACATLAN DE JUAREZ - COLIMA (CUOTA) | 154.01 | 142 | 208 | 348 | 458 |
| CD. VALLES - TAMPICO (PUENTE) | 4.38 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SAN MARTIN TEXMELUCAN - OCOTOXCO (CUOTA) | 32.17 | 32 | 65 | 117 | 156 |
| CD. ALEMAN - SAYULA (PUENTE) | 1.70 | 16 | 29 | 59 | 85 |
| MATEHUALA - SALTILLO (CUOTA) | 34.50 | 46 | 64 | 85 | 107 |
| MEXICO - QUERETARO (CUOTA) | 115.14 | 98 | 196 | 384 | 564 |
| QUERETARO - IRAPUATO (CUOTA) | 116.19 | 89 | 171 | 327 | 480 |
| MEXICO - TIZAYUCA (CUOTA) | 46.66 | 25 | 50 | 101 | 151 |
| MEXICO - LA MARQUESA (CUOTA) | 21.00 | 70 | 210 | 350 | 630 |
| MEXICO - PUEBLA (CUOTA) | 110.91 | 96 | 180 | 360 | 520 |
| LOS MOCHIS - CD. OBREGON | 185.69 | 50 | 78 | 116 | 133 |
| PUEBLA - CORDOBA (CUOTA) | 162.69 | 137 | 282 | 525 | 748 |
| COATZACOALCOS - VILLAHERMOSA (PUENTE) | 2.88 | 11 | 21 | 42 | 62 |
| TUXPAN - TAMPICO (PUENTE) | 2.30 | 26 | 50 | 96 | 133 |
| TULANCINGO - TUXPAN (CUOTA) | 7.06 | 20 | 45 | 90 | 133 |
| BUENA VISTA - TUXTEPEC | 119.36 | 16 | 29 | 59 | 85 |
| TECATE - TIJUANA (CUOTA) | 39.81 | 55 | 80 | 150 | 192 |
| MEXICALI - TECATE (CUOTA) | 20.41 | 40 | 82 | 133 | 200 |
| TIJUANA - ENSENADA (CUOTA) | 89.54 | 63 | 129 | 129 | 129 |
| CD. DEL CARMEN - CAMPECHE (PUENTE) | 3.17 | 0 | 0 | 0 | 0 |

TABLA 2.2 Cuotas en las Autopistas y Puentes del País

| NOMBRE | LONGITUD (KM) | TARIFA AUTOMOVILES | TARIFA AUTOBUSES | TARIFA CAMIONES DE 4 Y 5 EJES | TARIFA CAMIONES DE 6 O MAS EJES |
|---|---------------|--------------------|------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| LIBRAMIENTO DE MATAMOROS | 6.24 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ARMERIA - MANZANILLO (CUOTA) | 47.00 | 67 | 201 | 227 | 356 |
| CHIHUAHUA - MADERA | 108.40 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| JIMENEZ - CHIHUAHUA (CUOTA) | 138.80 | 92 | 232 | 380 | 675 |
| EL SUECO - CD. JUAREZ (CUOTA) | 89.72 | 83 | 175 | 325 | 515 |
| DURANGO - GOMEZ PALACIO (CUOTA) | 242.04 | 263 | 448 | 849 | 1103 |
| ZAPOTLANEJO – GUADALAJARA | 25.08 | 32 | 37 | 71 | 94 |
| LAGOS DE MORENO – ZAPOTLANEJO (CUOTA) | 126.39 | 144 | 192 | 280 | 340 |
| AUT. PEÑON - TEXCOCO (CUOTA) | 16.16 | 23 | 48 | 77 | 110 |
| ENT. MORELOS - PIRAMIDES (CUOTA) | 24.35 | 28 | 112 | 140 | 252 |
| LA PERA - CUAUTLA (CUOTA) | 34.16 | 38 | 70 | 106 | 160 |
| CHAPALILLA - COMPOSTELA (CUOTA) | 35.50 | 27 | 53 | 107 | 145 |
| TEPIC - CRUCERO DE SAN BLAS (CUOTA) | 25.00 | 25 | 40 | 70 | 100 |
| PUEBLA - ATLIXCO (CUOTA) | 28.50 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| LIBRAMIENTO DE SAN LUIS POTOSI | 33.75 | 31 | 57 | 68 | 109 |
| MAZATLAN - CULIACAN (CUOTA) | 181.50 | 170 | 277 | 318 | 439 |
| CULIACAN - LOS MOCHIS | 221.36 | 16 | 30 | 59 | 85 |
| LIBRAMIENTO DE NOGALES | 6.27 | 30 | 60 | 105 | 120 |
| LIBRAMIENTO DE EMPALME - GUAYMAS | 29.27 | 22 | 42 | 64 | 75 |
| CD. OBREGON - HERMOSILLO | 119.23 | 50 | 78 | 116 | 133 |
| HERMOSILLO - NOGALES | 195.87 | 50 | 78 | 116 | 133 |
| LIBRAMIENTO PTE. DE TAMPICO (CUOTA) | 13.99 | 20 | 32 | 52 | 62 |
| TEMPOAL - CANOAS | 89.11 | 14 | 27 | 50 | 75 |
| POZA RICA - VERACRUZ | 33.48 | 16 | 29 | 59 | 85 |
| PASO DEL TORO - ACAYUCAN | 232.62 | 16 | 29 | 59 | 85 |
| T. C. (COATZACOALCOS - SALINA CRUZ) - NUEVO TEAPA | 29.29 | 11 | 21 | 42 | 62 |
| LIBRAMIENTO DE CORDOBA - PEÑUELAS | 5.29 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| TECATE - LA RUMOROSA (CUOTA) | 55.50 | 40 | 82 | 133 | 200 |
| PATZCUARO – URUAPAN | 56.50 | 39 | 80 | 117 | 160 |
| MARAVATIO – ZAPOTLANEJO | 226.47 | 282 | 442 | 526 | 582 |

Continúa Tabla 2.2

| | | | | | |
|---|--------|-----|-----|-----|-----|
| LEON - LAGOS DE MORENO - AGUASCALIENTES (CUOTA) | 116.00 | 128 | 181 | 236 | 264 |
| LIBRAMIENTO CALERA DE VICTOR ROSALES | 6.49 | 9 | 15 | 43 | 59 |
| CHIHUAHUA - SACRAMENTO (CUOTA) | 21.80 | 26 | 66 | 110 | 195 |
| CARBONERA - PUERTO MEXICO - LOS CHORROS | 20.94 | 46 | 64 | 85 | 107 |
| ZACAPALCO - RANCHO VIEJO (CUOTA) | 17.30 | 22 | 46 | 80 | 112 |
| RANCHO VIEJO - TAXCO (CUOTA) | 8.34 | 8 | 16 | 27 | 37 |
| LIBRAMIENTO NORORIENTE DE QUERETARO | 37.00 | 30 | 45 | 45 | 60 |
| TEHUACAN - OAXACA | 243.00 | 140 | 283 | 341 | 538 |
| CADEREYTA - REYNOSA (CUOTA) | 132.01 | 160 | 202 | 296 | 329 |
| CHAMPOTON - CAMPECHE (CUOTA) | 39.00 | 43 | 64 | 110 | 143 |

2.5 Metodología para el Cálculo de Costos de Operación Vehicular (COV's)

Para el cálculo de COV's de los vehículos de autotransporte de carga, en este trabajo se utilizó el paquete de cómputo denominado "Vehicle Operating Cost (VOC)" (Referencia 2). Dicho paquete fue elaborado por el Banco Mundial, con el propósito de proporcionar a los planeadores una herramienta que genere información de COV's que contribuya a una confiable evaluación técnica y económica de sus opciones de inversión. Este paquete, estructurado por el Banco Mundial, se basó en diversos estudios realizados en diferentes países, de los cuales algunos cuentan con sistemas de transporte carretero con condiciones similares al de México, como es el caso de Brasil. Dichos estudios se refieren a una serie de modelos matemáticos para diferentes configuraciones vehiculares, que van desde automóviles hasta camiones de pasajeros y de carga. Algunos de los modelos generados son: (I) de consumo de combustibles, (II) de consumo de lubricantes, (III) de consumo de llantas, (IV) de salario de tripulantes, (V) de mantenimiento vehicular (incluye mano de obra y refacciones), (VI) de depreciación del vehículo, etc. En casi todos los casos, el VOC utiliza valores y modelos matemáticos generados en Brasil.

La función del modelo VOC es simular los efectos de las características físicas y condiciones del camino en las velocidades de operación de varios tipos de vehículos, en sus consumos de combustibles y lubricantes, en sus requerimientos de mantenimiento, etc., y determinar sus costos totales de operación, para lo cual requiere que sean introducidos previamente algunos costos unitarios (p. ej., de combustibles, lubricantes, llantas, etc.). Para esto, el modelo calcula las cantidades consumidas de recursos, tales como litros de combustible, número de llantas, horas-hombre (h-h) de trabajo, etc., así como la velocidad del vehículo como función de las características de cada tipo de vehículo y la geometría, tipo de superficie y condición actual del camino.

Los pasos seguidos por el modelo en el cálculo de la velocidad, uso de recursos y costos de operación para un tipo de vehículo dado y una sección de camino determinada, son:

- 1 Calcular la velocidad de operación promedio para el vehículo seleccionado.

- 2 Calcular las cantidades de recursos utilizadas por cada 1,000 vehículos-kilómetro (v-km) para los siguientes componentes:
 - Consumo de combustibles.
 - Consumo de lubricantes.
 - Consumo de llantas.
 - Tiempo de los tripulantes.
 - Tiempo de los pasajeros.
 - Tiempo o retención de la carga.
 - Mano de obra o de mantenimiento.
 - Refacciones.
 - Depreciación.
 - Interés.
 - Indirectos.
- 3 Aplicar costos unitarios a las cantidades consumidas de recursos para obtener el costo de operación por cada 1,000 v-km para cada componente.
- 4 Sumar los costos de operación para cada componente con el fin de calcular el costo de operación vehicular total por cada 1,000 v-km.

3 Desarrollo del Sistema

3.1 Enfoque

Como ya se indicó, en este trabajo se utiliza el SIG denominado ArcView (Referencia 3). Por esta razón, el enfoque que se sigue en el desarrollo del sistema consiste en ir integrando en un proyecto de ArcView, una serie de elementos de información que incluyen: (I) datos para la representación cartográfica de la Red Carretera Federal, (II) datos geométricos y operativos de la misma, y (III) un conjunto de ecuaciones para estimar los costos de operación vehicular (COV's) a partir de los dos tipos de datos anteriores.

El desarrollo del sistema incluye la modelación de la conectividad entre los diferentes elementos de la Red, de manera que la modelación resulte completamente apegada a la realidad en ese sentido. La modelación de la conectividad hace posible realizar, con el sistema desarrollado, algunas aplicaciones del Analista o Módulo de Redes de ArcView (Referencia 4). Las redes urbanas son modeladas con menor detalle.

En ArcView, un proyecto es un archivo que contiene todas las vistas, tablas, gráficas, etc., utilizadas en una aplicación específica. Una vista es un mapa en el que se presentan un conjunto de datos espaciales y no-espaciales. Un dato espacial o rasgo geográfico es aquél vinculado a una ubicación geográfica determinada (p. ej., un segmento de calle, carretera, etc.). Cada conjunto de datos ingresados en una vista constituye un tema. Para cada tema existe una Tabla de Atributos, la cual es una base de datos que almacena en diferentes campos las características específicas de cada rasgo geográfico.

Para el desarrollo de este trabajo se generó un proyecto de ArcView denominado "red.apr".

3.2 Información Cartográfica

Los siguientes temas que contienen información cartográfica, fueron importados de coberturas de ArcInfo del SIGET, a una vista del proyecto "red.apr" denominada "Modelo Red IMT":

- “Nodos.shp”. En este tema, cada registro corresponde a un punto que es inicio o terminación de cualquiera de los 9,150 tramos contenidos en el tema “Highways.shp”. A su vez, dichos puntos corresponden a entronques de caminos o poblaciones. Este tema contiene 7,000 puntos, de los cuales 3,302 son poblaciones. En este tema se incluyen, en campos, los siguientes datos para cada nodo: (I) nombre de la población representada por el nodo (campo “Nombre”); (II) identificador (“Id01”), constituido por un número consecutivo de dos dígitos dado al Estado en que se encuentra el nodo (por orden alfabético del nombre de los Estados), más un número consecutivo de tres dígitos dado a cada nodo (por orden alfabético del nombre de las poblaciones); (III) longitud geográfica del nodo (“Longitude”); (IV) latitud geográfica del nodo (“Latitude”); (V) clave del Estado (“Clave_edo”), constituida por tres letras correspondientes a la abreviatura del nombre del Estado; y (VI) variable binaria que es igual a 1 si el nodo o población es capital de Estado y 0 si no lo es (“Capital”).
- “Highways.shp”. En este tema o archivo, cada registro corresponde a una poligonal abierta que representa un tramo de la Red Carretera del país. Este tema incluye 9,150 tramos (algunos de los cuales son puentes) correspondientes a las siguientes jurisdicciones: (I) Red Carretera Federal, (II) Red de Caminos Estatales pavimentados, (III) autopistas de cuota de Caminos y Puentes Federales (CAPUFE), (IV) autopistas del Banco Nacional de Obras y Servicios (BANOBRAS), (V) autopistas concesionadas, y (VI) otros caminos del país. En total este tema incluye cerca de 100 mil kilómetros de caminos nacionales. En este tema, los tramos se encuentran clasificados en las 6 jurisdicciones anteriores. Este estudio sólo se refiere a las carreteras de las jurisdicciones en los puntos (I), (III), (IV) y (V), es decir, no considera carreteras de “jurisdicción estatal” ni “otros caminos del país”. La Tabla 3.1 muestra el número de registros en este tema, correspondiente a las 6 jurisdicciones anteriores, así como la longitud total de carreteras registrada en este tema para cada jurisdicción. En esta tabla es evidente que las carreteras a las que se refiere este trabajo tienen una longitud total de 45,435 kilómetros (48.6% de la longitud de la red total, repartido en 4,126 tramos).

Tabla 3.1 Número de Registros y Longitud por Jurisdicción, en el Tema “Highway.shp”

| JURISDICCION | REGISTROS | % | LONGITUD (KM) | % |
|----------------------|------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| Federal | 3,840 | 42.1 | 39,797.3 | 42.6 |
| Estatal | 4,914 | 53.7 | 46,907.9 | 50.2 |
| CAPUFE | 96 | 1.0 | 1,424.3 | 1.5 |
| BANOBRAS | 96 | 1.0 | 2,647.9 | 2.8 |
| Concesionadas | 94 | 1.0 | 1,565.5 | 1.7 |
| Otras | 110 | 1.2 | 1,100.0 | 1.2 |
| TOTAL | 9,150 | 100.0 | 93,442.9 | 100.0 |

La red que se forma con todos los tramos contenidos en este tema, es una red que tiene continuidad en todas las uniones o intersecciones entre tramos, lo cual es un requisito para poder usar en ella el Módulo de Redes de ArcView. Para esto último, hace falta aún, por supuesto, integrar al sistema, las bases de datos que permiten estimar el costo (o tiempo, o distancia, etc.) de circular por cada tramo. Este será el objetivo de la siguiente sección del presente capítulo. En este tema se incluyen, en campos, los siguientes datos para cada tramo: (I) nombre del tramo según nomenclatura de la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) (“Nombre”); (II) identificador (“Id1”), constituido por un número consecutivo de dos dígitos dado al Estado en que se encuentra el tramo, más un número de cinco dígitos correspondiente a la clave dada por la DGST a la carretera a la que pertenece el tramo, más un número consecutivo de dos dígitos (p. ej. 01, 02, 03, etc.) dado a los tramos de la carretera (por orden alfabético de su nombre); (III) longitud según hitos kilométricos (proporcionada por la DGST) entre cada par de nodos que definen al tramo (“Length”); (IV) longitud del tramo obtenida con ArcView (“Length_av”); (V) clasificación funcional del tramo (“Clas_funcd”), ya sea A2 si es autopista de dos carriles, A4 autopista de cuatro carriles, C2 carretera libre de dos carriles, C4 carretera libre de cuatro carriles, C6 carretera libre de seis carriles, P2 puente de dos carriles, P4 puente de cuatro carriles, VU2 vía urbana de dos carriles y VU4 vía urbana de cuatro carriles; (VI) número de carriles del tramo (“Carriles”), ya sean 2, 4 o 6; (VII) variable alfanumérica binaria que es “SI” si el tramo es de cuota o “NO” si no lo es (“Cuota”); (VIII) variable binaria que define el medio en el que se encuentra el tramo, “1” si es urbano o “2” si es rural (“Medio”); (IX) variable que define la jurisdicción a la que pertenece el tramo, según las 6 categorías ya mencionadas (“jurisdic”); y (X) variable formada por 3 ó 4 letras para definir el tipo de superficie del camino, “BREC” para las Brechas, “PAV” para caminos pavimentados y “REV” para caminos Revestidos (“Supeficie”). La mayoría de estos datos para carreteras federales fueron obtenidos de la DGST (Referencias 6, 12, 14 y 15).

- “Manchas.dxf”. En este tema, cada registro corresponde a una poligonal cerrada que representa algunas ciudades importantes del país. Este tema contiene 121 ciudades en total, incluyendo algunas

delegaciones que se encuentran en el Distrito Federal y en el Estado de México.

- “Zonas.shp”. En este archivo, cada registro corresponde a una poligonal cerrada que representa las 200 diferentes zonas de desarrollo que considera el Consejo Nacional de Población (CONAPO) dentro del “Sistema de Ciudades y Distribución de la Población en México, 2000” (Referencia 19). En este tema se incluyen, en campos, los siguientes datos para cada tramo: (I) nombre de la zona de desarrollo según la CONAPO (“Centroide”); (II) identificador (“Id”), constituido por un número consecutivo de dos dígitos dado a la zona (por orden alfabético con respecto al nombre de la zona); (III) el área en Km² de cada zona (“Area_km2”) y (IV) clave del Estado (“Edo”), constituida por tres letras correspondientes a la abreviatura del nombre del Estado a la que pertenece la zona.
- “Estados.dxf”. En este archivo cada registro corresponde a un polígono. El conjunto de todos los polígonos define la división política (o por Estados) de la República Mexicana.

Como es evidente, la mayoría de los archivos anteriores contienen en su nombre la extensión “shp”, que es un distintivo que ArcView utiliza para identificar los archivos que siguen el formato de datos espaciales de ArcView (“shapefiles”). Otros complementan su nombre con la extensión dxf”, que es un distintivo de archivos realizados en diseño asistido por computadora (CAD).

Una vez importados los temas anteriores a la vista “Modelo Red IMT”, se obtuvo el mapa que se muestra en la Figura 3.1. La Tabla de Contenidos, a la izquierda del mapa, indica los temas incluidos en la vista. Así mismo, con una marca a la izquierda de sus letreros descriptivos o leyendas, se señalan los temas activados o dibujados en la vista. Como es evidente en la figura, todos los temas han sido activados (“highways.shp” bajo la leyenda “Red Carretera”, “nodos.shp” bajo la leyenda “Nodos”, “manchas.dxf” bajo la leyenda “Manchas Urbanas”, “zonas.shp” bajo la leyenda “Zonas” y “estados.dxf” bajo la leyenda “División Política Estatal”). En ArcView, los temas activados son dibujados de abajo hacia arriba según se listan en la Tabla de Contenidos.

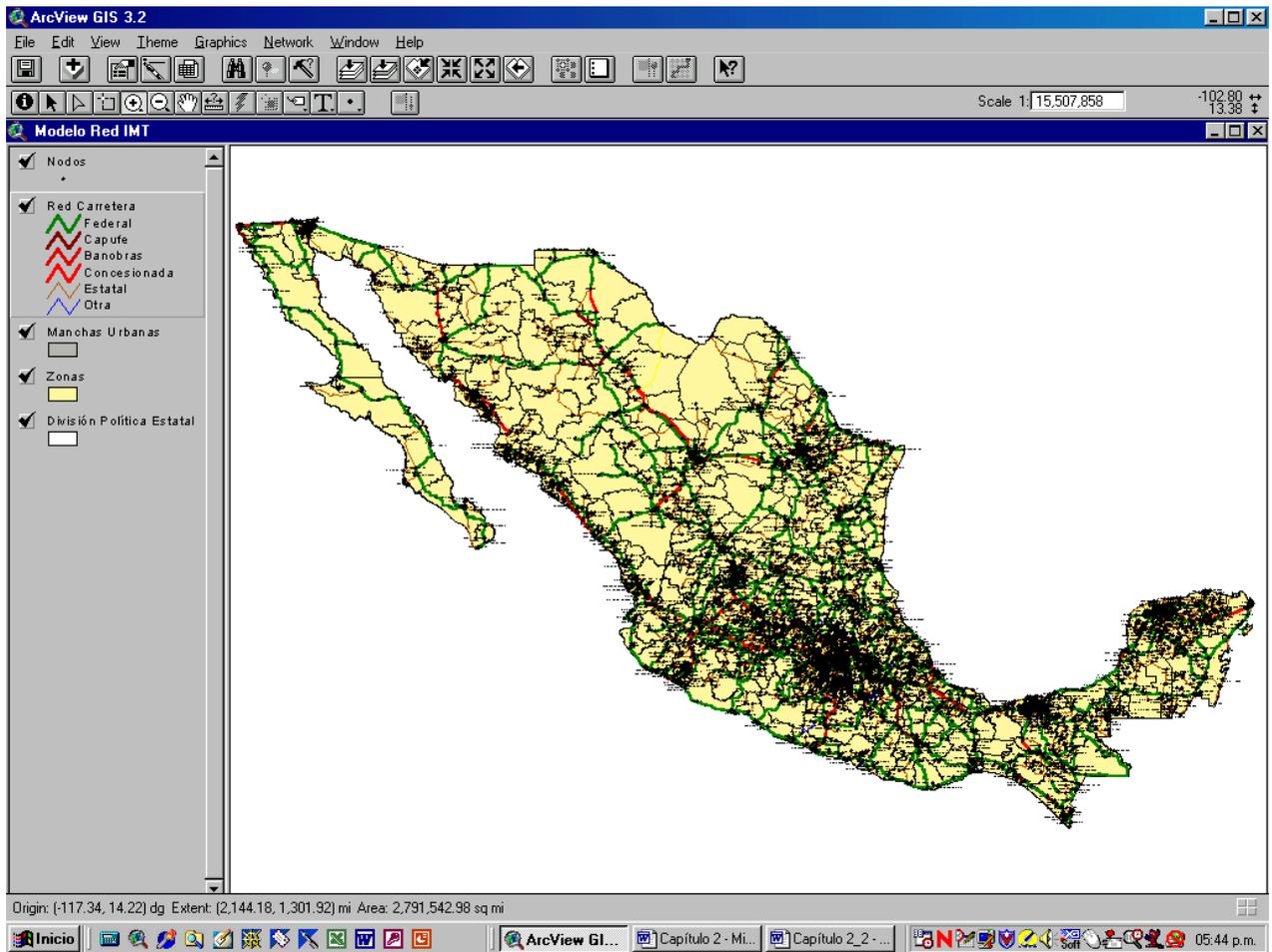


Figura 3.1 Red Carretera del País Importada de ArcInfo

La Figura 3.1 incluye el nombre de todas las poblaciones dentro del tema "nodos.shp". Aunque en la escala de la figura dichos nombres casi no se perciben, al hacer un acercamiento de una región en el mapa (mediante un "zoom"), los nombres en ella aumentarán de tamaño de acuerdo con la nueva escala.

3.3 Integración de Bases de Datos

Se integran a los temas de la vista "Modelo Red IMT" (principalmente al tema "Highways.shp") un conjunto de datos adicionales, necesarios para la estimación de los COV's del autotransporte de carga. Estos son, para cada tramo de la Red, aforo con clasificación vehicular, nivel de servicio, tipo de terreno, curvatura y cuota de las autopistas. Otro dato requerido para la estimación de COV's es el estado del pavimento (rugosidad), el cual ya fue incorporado dentro de los temas importados.

3.3.1 Aforos con Clasificación Vehicular

El siguiente paso en la construcción del sistema consistió en vincular al tema "Highways.shp" de la vista "Modelo Red IMT", la información de aforos y composición vehicular generada por la DGST para la Red Carretera Federal pavimentada para el año 2000 (Referencia 12). En realidad lo que se añadió a cada tramo carretero en la vista (cada registro de la tabla de atributos correspondiente), fue un promedio de una serie de aforos y porcentajes de composición vehicular recabados por la DGST en un conjunto de estaciones ubicadas en la carretera (según la clasificación de carreteras de la DGST) de la que forma parte el tramo.

El proceso de vinculación anterior consistió en, primero, generar la base de datos (o tabla) de valores promedio por carretera, en donde cada registro corresponde a una carretera identificada mediante la clave dada por la DGST a la carretera (número de cinco dígitos). Posteriormente, esta base de datos y el tema "Highways.shp" de la vista "Modelo Red IMT" fueron vinculados con base en los identificadores de carretera, mediante la herramienta "Join" de ArcView. Cabe recordar que en el tema "Highways.shp", el identificador de carretera (clave dada por la DGST a la carretera) está contenido dentro del identificador del tramo.

3.3.2 Capacidad y Niveles de Servicio

Para la Red bajo estudio (carreteras federales pavimentados, autopistas de cuota de CAPUFE, autopistas de BANOBRAS y autopistas concesionadas), la información de capacidad y niveles de servicio de la DGST (Referencia 14) fue integrada al sistema siguiendo un procedimiento similar al empleado para los aforos con clasificación vehicular. También en este caso, a partir de los datos de la DGST (publicados a nivel tramos), en una base de datos se generaron para cada carretera valores ponderados (por la longitud de sus tramos) de flujo vehicular horario, flujos evaluados para los niveles de servicio A a F y el nivel de servicio actual. En esta tabla también se ingresó el tipo de terreno promedio para cada tramo, por encontrarse esta información también disponible en la publicación sobre capacidad y niveles de servicio de la DGST (Referencia 14). Posteriormente, esta base de datos y el tema "Highways.shp" de la vista "Modelo Red IMT" fueron vinculados con base en los identificadores de carretera.

3.3.3 Tipo de Terreno

Por lo dicho en la sección anterior, esta información quedó vinculada al tema de la vista denominada "Modelo Red IMT" al vincularse al mismo la información de capacidad y niveles de servicio.

3.3.4 Estado del Pavimento

Esta información fue integrada al sistema siguiendo un procedimiento similar al empleado para los datos de Capacidad y Niveles de Servicio.

3.3.5 Curvatura

Para todos los tramos de la Red considerada, el cociente de la suma de los valores absolutos de las deflexiones a lo largo del tramo entre la longitud del mismo (C), fue estimado de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- Se tomó aleatoriamente una muestra de 100 tramos, calculándose para cada uno de ellos, a partir del dibujo de su vista horizontal, el valor de C y del cociente de su longitud registrada en ArcView (L) entre la longitud en línea recta de su punto de inicio a su punto de terminación (Lr).

- La muestra de 100 pares de datos C versus L/Lr permitió generar la siguiente ecuación de regresión, con un coeficiente de determinación R^2 de 0.8:

$$C = \sqrt[2.15]{\frac{L/Lr - 1}{1.299 \times 10^{-6}}} \quad \text{Ec. 3.1}$$

- Finalmente, la ecuación anterior fue utilizada, en ArcView, para estimar el valor de C para los 4,126 tramos de la Red considerada, a partir de sus correspondientes cocientes L/Lr. En éstos, los valores de L se obtuvieron directamente del tema "Highways.shp", en tanto que, para contar con los valores de Lr, fue necesario correr una subrutina de ArcInfo sobre el tema anterior para generar, primero, las coordenadas de los puntos de inicio y terminación de cada tramo. A partir de estas coordenadas, posteriormente se obtuvieron los valores de Lr correspondientes.

3.3.6 Cuotas

En este caso, la cuota cobrada en un puente o autopista de cuota fue prorrateada entre sus tramos componentes, de acuerdo con la longitud de estos últimos en relación con la longitud total del puente o autopista. Las cuotas por tramo resultantes fueron posteriormente convertidas a dólares utilizando un tipo de cambio de 10 pesos por dólar y vinculadas a la Red modelada utilizando el mismo método que en los casos anteriores.

3.3.7 Límite de Velocidad

De acuerdo con el Reglamento de Tránsito de Carreteras Federales (Referencia 20) y prácticas de velocidad de operación de los conductores de camiones de carga (Referencia 21), se ingresaron al sistema como valores límite de velocidad, 100 km/hr para tramos de carreteras libres y 110 km/hr para tramos de autopista de cuota.

3.4 Incorporación de Costos de Operación Vehicular

Otras fuentes (Referencias 22 y 23) reportan los porcentajes de participación en el transporte de toneladas-km de carga indicados en la Tabla 3.2, para las distintas configuraciones vehiculares autorizadas en

Tabla 3.2 Participación de las Distintas Configuraciones en el Transporte Nacional de Toneladas-Km de Carga

| TIPO DE VEHICULO | % DE LA CONFIG. DE CARGA | % DE VEHICULOS CARGADOS | PESO CARGA PROM. (TON) | DISTANCIA MEDIA CON CARGA (KM) | DISTRIBUCION RELATIVA DE TON-KM TRANSPORTADAS | % |
|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|--|--------------|
| C-2 | 32.2 | 67.2 | 5.8 | 421.0 | 528.4 | 7.2 |
| C-3 | 21.4 | 71.2 | 11.3 | 566.0 | 974.5 | 13.3 |
| T3-S2 | 22.7 | 76.7 | 18.5 | 738.0 | 2,377.1 | 32.3 |
| T3-S3 | 18.3 | 75.7 | 27.0 | 718.0 | 2,685.6 | 36.5 |
| T3-S2-R4 | 2.8 | 78.4 | 38.9 | 726.0 | 620.0 | 8.4 |
| Otros | 2.6 | 72.2 | 14.9 | 591.0 | 165.3 | 2.2 |
| | 100.0 | | | | 7,350.8 | 100.0 |

Fuente: Elaboración propia con base en las Referencias 22 y 23

Carreteras Federales por el Reglamento de Pesos y Dimensiones Máximos vigente (Referencia 24). Esta tabla hace evidente que, de todas las configuraciones autorizadas por el Reglamento anterior, las 5 indicadas en esta tabla son las que mayor contribución realizan al movimiento de toneladas-km. Puede observarse en la tabla que las mayores participaciones corresponden a las configuraciones T3-S2 y T3-S3, con porcentajes relativamente similares.

Se selecciona al T3-S2 para las condiciones de operación de plena carga (hasta donde permite el peso máximo autorizado por el Reglamento a esta configuración) y en vacío, como casos de referencia para la mayoría de los análisis que serán efectuados, considerando las participaciones relativas ya mencionadas de las configuraciones, así como otras ventajas de carácter económico-operativo del T3-S2 (p. ej. observa una mucho menor frecuencia de violaciones al Reglamento de Pesos Máximos que el T3-S3, es la configuración que más participa en el comercio internacional con Estados Unidos (Referencia 22), etc.).

El enfoque seguido en este trabajo para la integración de COV's en el sistema consiste en adoptar un conjunto de ecuaciones de regresión, generadas en la Referencia 1 a partir del programa "Vehicle Operating Cost (VOC)" del Banco Mundial, para determinar los costos de operación vehicular (COV's) para los casos de referencia. A partir de éstos y de un conjunto de factores de equivalencia, también adoptados de la Referencia 1, se obtienen los COV's para las condiciones de operación en vacío y de plena carga de los demás vehículos de carga más comunes.

Para el T3-S2 a plena carga se asumió una "carga transportada" igual a 28.8 ton, que junto con el "peso del vehículo vacío" de 15.2 ton, hacen un peso bruto vehicular total de 44 ton, el cual es el máximo permitido a esta configuración vehicular por el Reglamento de Pesos. Para la condición de operación en vacío se ingresó en el programa una "carga transportada" igual a 0 ton.

Algunos estudios anteriores han demostrado que existe una correlación muy estrecha entre el COV y la velocidad de operación (VO) (Referencias 25 y 26). Ha sido también demostrado que, además del peso de la "carga transportada" (variable que ya está tomada en cuenta en la condición de plena carga o en vacío), las características relevantes a este estudio que más influyen en la VO de un vehículo de carga en un segmento carretero,

son: la pendiente del segmento (M); su curvatura (Q), medida por el cociente de la suma de los valores absolutos de las deflexiones de las curvas a lo largo del segmento entre la longitud del mismo; la calidad de la superficie de rodamiento, que puede medirse mediante el Índice Internacional de Rugosidad (IRI) (Referencia 27); el límite de velocidad (LV); y el nivel de servicio o saturación (S), que es un reflejo del cociente de la intensidad del flujo vehicular entre la capacidad efectiva del segmento (Referencia 13).

A partir de los resultados anteriores, la Referencia 1 genera para ambos casos de referencia, una ecuación de regresión para la relación del COV contra la VO, y otra para la relación de la VO contra las variables M, Q, IRI y LV. Así mismo, para ambos casos, se incluye el efecto del nivel de servicio (S) mediante un factor de reducción de la VO para niveles inferiores al A. Este factor se calcula mediante otra ecuación de regresión, obtenida a partir de información contenida en el Manual de Capacidad de Carreteras de los Estados Unidos (Referencia 13).

Para el caso del T3-S2 a plena carga, las ecuaciones de regresión generadas en la Referencia 1, son:

Para la **VO** contra las variables **M, Q, IRI** y **LV**:

$$\begin{aligned} \mathbf{VO} = & 10.3235 - 1.9331 \mathbf{M} + 0.6137 \mathbf{LV} - 0.03411 (\mathbf{IRI}) (\mathbf{LV}) \\ & + 0.00219 (\mathbf{M}) (\mathbf{Q}) - 0.000361 (\mathbf{Q}) (\mathbf{LV}) + 0.0000295 (\mathbf{IRI}) (\mathbf{Q}) (\mathbf{LV}) \\ & - 0.0000196 (\mathbf{M}) (\mathbf{Q}) (\mathbf{LV}) \end{aligned} \quad \text{Ec. 3.2}$$

donde:

VO, es la velocidad de operación (en Km/h);

M, es la pendiente (en %);

Q, es la curvatura del segmento (en grados/km);

IRI, es el índice internacional de rugosidad (en m/km); y

LV, es el límite de velocidad (en kilómetros/h).

La ecuación anterior se obtuvo con un coeficiente de determinación R^2 (indicativo de la calidad del ajuste) de 0.87.

Para el **COV** contra la **VO**:

$$\mathbf{COV} = 1,000 + e^{-53.695} \times (300 - \mathbf{VO})^{10.903} \quad \text{Ec. 3.3}$$

donde:

COV, es el COV por cada 1000 v-k (en dólares/1000 v-k);

e, es la base de los logaritmos naturales, es decir, 2.71828; y

VO, es como ya se definió.

La ecuación anterior se obtuvo con un R^2 de 0.93.

Para el caso del T3-S2 en vacío, las mejores ecuaciones de interpolación obtenidas son como se indica enseguida.

Para la **VO** contra las variables **M**, **Q**, **IRI** y **LV**:

$$\begin{aligned} \mathbf{VO} = & 10.663 + 0.775 \mathbf{LV} - 0.044 (\mathbf{IRI}) (\mathbf{LV}) - 0.0346 (\mathbf{M}) (\mathbf{LV}) \\ & - 0.000399 (\mathbf{Q}) (\mathbf{LV}) + 0.00302 (\mathbf{IRI}) (\mathbf{M}) (\mathbf{LV}) \\ & + 0.0000334 (\mathbf{IRI}) (\mathbf{Q}) (\mathbf{LV}) + 0.0000343 (\mathbf{M}) (\mathbf{Q}) (\mathbf{LV}) \\ & - 0.00000312 (\mathbf{IRI}) (\mathbf{M}) (\mathbf{Q}) (\mathbf{LV}) \end{aligned} \quad \text{Ec. 3.4}$$

donde:

todas las variables son como ya fueron definidas.

La ecuación anterior se obtuvo con un R^2 de 0.94.

Para el **COV** contra la **VO**:

$$\mathbf{COV} = 1,000 + e^{-45.165} \times (300 - \mathbf{VO})^{9.396} \quad \text{Ec. 3.5}$$

donde:

todas las variables ya fueron definidas.

La ecuación anterior se obtuvo con un R^2 de 0.90.

$$FV = [2.67 \times (S + 0.8)^{0.0663}] - 2 \quad \text{Ec. 3.6}$$

La relación obtenida para tomar en cuenta el efecto en la VO de niveles de servicio menores que A, es:

donde:

FV, es el factor de reducción de la VO para niveles de servicio inferiores al A; y

S, es igual a 5 si el nivel de servicio es "A", 4 si es "B", 3 si es "C", 2 si es "D", 1 si es "E" y 0.1 si es "F".

La ecuación anterior se obtuvo con un R^2 de 1.

Como ya se indicó, también se toman de la Referencia 1 un conjunto de factores que permiten obtener, a partir de los COV's del vehículo de referencia (T3-S2), los COV's de los otros vehículos más comunes. Dichos factores, que también fueron generados a partir de corridas del programa VOC, se presentan en la Tabla 3.3. Como puede observarse en la tabla, para cada configuración se reportan dos factores, uno para la condición de plena carga y otro para la condición en vacío. Esto obedece a que, de acuerdo con la Referencia 1, el comportamiento del COV para un mismo vehículo entre esas dos condiciones, sí es significativamente diferente.

En la Tabla 3.3 es también evidente que los dos factores de cada vehículo, son muy similares; por lo que en la última columna se presenta el promedio de ambos, el cual, con base en este resultado, puede utilizarse de manera global para cualquier porcentaje de llenado, a condición de que éste sea el mismo entre la configuración de referencia (T3-S2) y aquella para la cual se obtiene el COV a partir del COV del T3-S2.

Tabla 3.3 Factores de Relación del COV de Diferentes Tipos de Vehículos en relación con el T3-S2

| CONFIGURACION | Factor de Relación del COV de cada Configuración entre el del T3-S2 | | |
|-----------------|---|--------------------|----------|
| | CONDICION DE PLENA CARGA | CONDICION EN VACIO | PROMEDIO |
| C2 | 0.537 | 0.521 | 0.529 |
| C3 | 0.599 | 0.581 | 0.590 |
| T3-S3 | 1.063 | 1.061 | 1.062 |
| T3-S2-R4 | 1.289 | 1.241 | 1.265 |

El resultado anterior sugiere la posibilidad de evaluar los COV's para cualquier porcentaje de llenado, realizando la interpolación correspondiente entre los COV's en vacío y de plena carga estimados mediante las ecuaciones antes mostradas. Este será el enfoque que se aplicará en análisis presentados más adelante. Con el fin de facilitar estas interpolaciones, la Tabla 3.4 reproduce los tonelajes de carga transportada asumidos en este trabajo para la condición de plena carga (100% de llenado) de las 5 configuraciones consideradas. Se muestran también en la tabla las taras (pesos propios en vacío) y los pesos brutos vehiculares de plena carga (máximos reglamentados), considerados en este trabajo.

El último paso en la construcción del sistema consistió en integrar las Ecuaciones 3.2 a 3.6, con el fin de generar la información de costos de operación vehicular requerida para cada segmento. El proceso efectuado con este propósito consistió en: (I) exportar a un archivo electrónico en el formato DBASE (base electrónica de datos), la tabla de atributos del tema "Highways.shp" (mediante la herramienta "Export" del menú "File" de tablas de atributos); y (II) con base en la información contenida en dicho archivo (pendiente, IRI, etc.), calcular las diferentes variables indicadas en la Tabla 3.4, utilizando las herramientas del manejador de bases de datos Visual Fox Pro (Referencia 10). Esta última tabla muestra la estructura de la base de datos obtenida después de eliminarle los insumos de las Ecuaciones 3.2 a 3.6, quedándose sólo con los valores calculados. En ella figuran, además del identificador de cada tramo ("Id1").

Tabla 3.4 Tara, Tonelaje Máximo de Carga y Peso Bruto Vehicular Máximo Considerados para las Configuraciones

| CONFIGURACION | TARA (Ton) | TONELAJE MAXIMO DE CARGA (Ton) | PESO BRUTO VEHICULAR MAXIMO (Ton) |
|----------------------|-----------------------|---|--|
| C2 | 4.1 | 13.4 | 17.5 |
| C3 | 8.3 | 17.7 | 26.0 |
| T3-S2 | 15.2 | 28.8 | 44.0 |
| T3-S3 | 18.8 | 29.7 | 48.5 |
| T3-S2-R4 | 23.9 | 42.6 | 66.5 |

4 Generación de Algunos Resultados

Se presentan dos tipos de resultados, unos que son reflejo directo de los datos integrados al sistema, y otros que se obtienen a partir de procesos más elaborados.

4.1 Obtenidos Directamente de los Datos Integrados al Sistema

4.1.1. Aforos con Clasificación Vehicular

Un primer tipo de resultados que pueden generarse a partir del sistema desarrollado consiste en la generación de vistas o representaciones geográficas en ArcView, obtenidos directamente de los datos integrados al sistema. En la Figura 4.1, se muestra el mapa con la representación del Transito Diario Promedio Anual (TDPA) asignado a cada carretera. En esta representación, los aforos (TDPA) circulantes por los diferentes tramos son representados mediante líneas de diferente grosor e intensidad de rojo, correspondientes a 5 rangos de valores del TDPA, los cuales se encuentran indicados en la Tabla de Contenidos a la izquierda del mapa. En la figura son evidentes los tramos, carreteras y corredores nacionales por los que circulan los flujos de mayor magnitud.

Otra manera de ver la información contenida en la Figura 4.1 es a través de las distribuciones de frecuencias de tramos y longitudes dentro de los mismos 5 niveles de TDPA en que se clasifican los tramos en la Figura 4.1. Estas distribuciones de frecuencias se presentan en la Tabla 4.1. Tanto en la Figura 4.1 como en Tabla 4.1 es evidente que un porcentaje importante de la Red considerada (más del 50%) soporta flujos vehiculares bastante considerables (TDPA por encima de 3000).

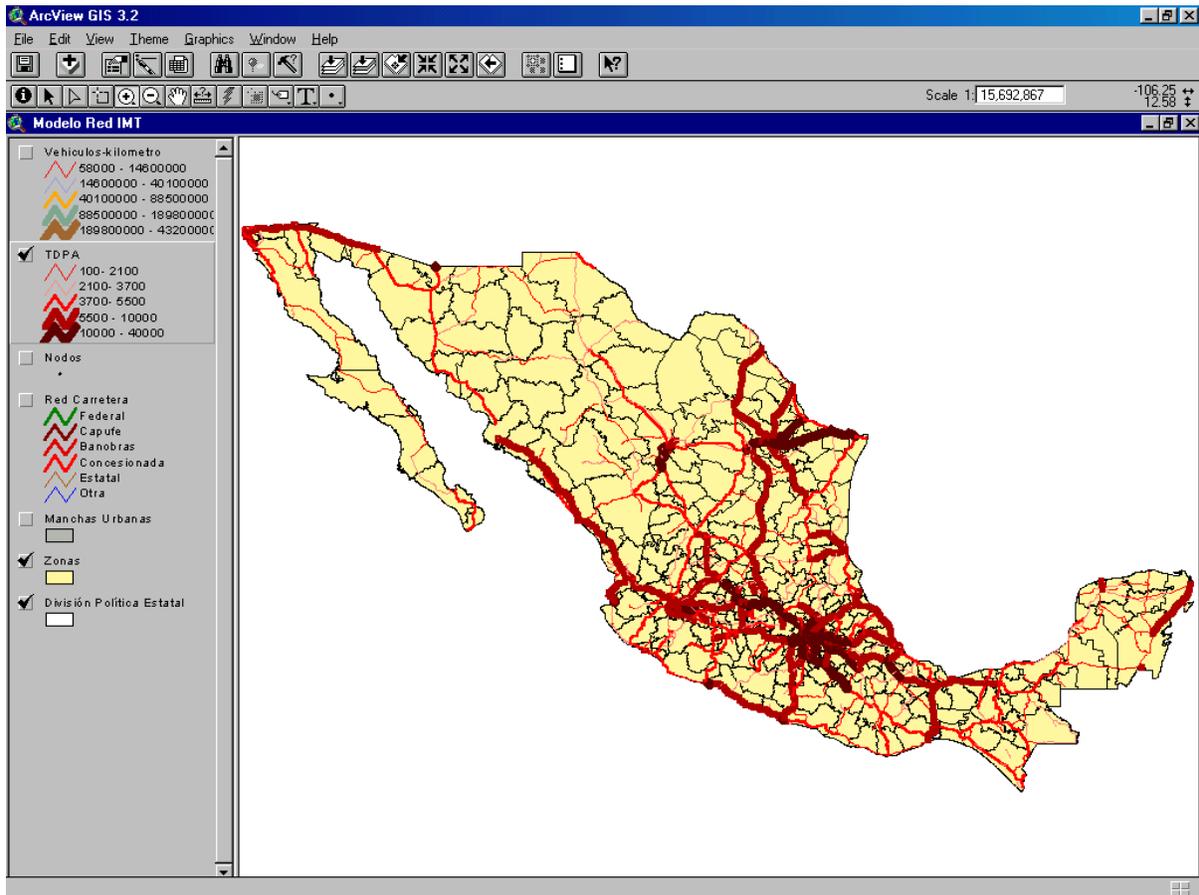


Figura 4.1 TDPA de las Diferentes Carreteras Federales del País (Promedio Ponderado)

Tabla 4.1 Porciones de la Red dentro de Diferentes Rangos de TDPA

| Rangos de TDPA | No. de tramos | % | Longitud de la Red (km) | % |
|-----------------|---------------|--------------|-------------------------|--------------|
| 1,000 – 2,100 | 499 | 12.1 | 9,799.5 | 21.6 |
| 2,100 – 3,700 | 1,454 | 35.2 | 14,944.0 | 32.9 |
| 3,700 – 5,500 | 815 | 19.8 | 10,012.6 | 22.0 |
| 5,500 – 10,000 | 962 | 23.3 | 8,370.8 | 18.4 |
| 10,000 – 40,000 | 396 | 9.6 | 2,308.2 | 5.1 |
| TOTAL | 4,126 | 100.0 | 45,435.0 | 100.0 |

4.1.2 Vehículos-Kilómetro

Otro tipo de resultado que puede obtenerse se refiere al cálculo, mediante operaciones aritméticas directas sobre los datos integrados, de ciertos valores de interés. Algunos de éstos son los vehículos-kilómetro recorridos en toda o diferentes tramos de la Red. Para toda la Red, la Tabla 4.1 presenta el parámetro anterior calculado a partir de la información de aforos con clasificación integrada en el tema “highways.shp” del sistema. En la tabla se presenta dicho parámetro para el año 2000, tanto para todo el flujo como dividido entre automóviles, autobuses y camiones.

Los vehículos-kilómetro totales fueron obtenidos de multiplicar el TDPA por la longitud de ArcView de cada arco (“Length_av”) por 365 días, almacenando los valores resultantes en un nuevo campo de la Tabla de Atributos del tema “highways.shp”, siendo estos últimos posteriormente sumados para obtener el resultado deseado. Un procedimiento similar fue utilizado para obtener los vehículos-kilómetro recorridos por tipo de vehículo (automóviles, autobuses y camiones), aunque en este caso hubo de involucrarse en las operaciones aritméticas anteriores el porcentaje de composición vehicular correspondiente.

La Tabla 4.2 indica que por la Red considerada se recorrieron alrededor de 80 mil millones de vehículos-kilómetro en 2000. De éstos, más del 75% fueron recorridos por automóviles, más del 5% por autobuses y el 20% restante por camiones de carga. En la Tabla 4.2 también se muestran estimados obtenidos con base en la longitud de los tramos registrada por la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) (“Length”). Como es evidente en la tabla, se generan en este caso resultados similares a los obtenidos con base a las longitudes de ArcView.

Tabla 4.2 Vehículos-Kilómetro Recorridos en la Red de Interés

| Tipo de Vehículo | Veh-Km (1e6) según Long. ArcView | % | Veh-Km (1e6) según Long. DGST | % |
|--------------------|----------------------------------|--------------|-------------------------------|--------------|
| Automóviles | 59,117.81 | 76.7 | 63,103.94 | 76.7 |
| Autobuses | 4,134.12 | 5.4 | 4,418.71 | 5.4 |
| Camiones | 13,792.68 | 17.9 | 14,729.14 | 17.9 |
| Total | 77,044.62 | 100.0 | 82,251.79 | 100.0 |

La Figura 4.2 muestra una vista en la que los tramos han sido clasificados de acuerdo con los 5 rangos de valores de vehículos-kilómetro indicados en la Tabla de Contenidos a la izquierda del mapa. En la figura son evidentes los tramos, carreteras y corredores nacionales por los que se generan los mayores valores de vehículos-kilómetro.

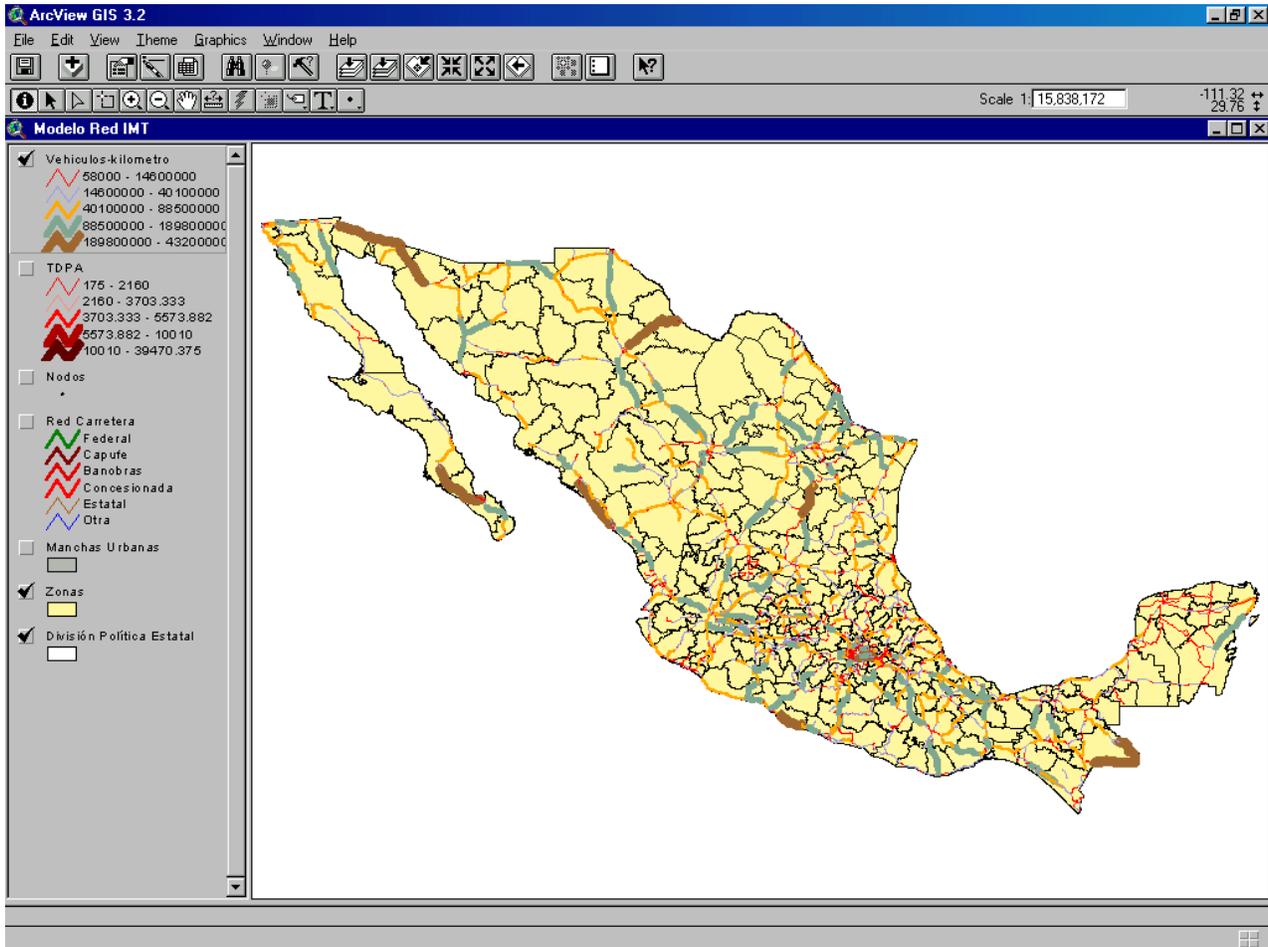


Figura 4.2 Vehículos - Kilómetro en las Diferentes Carreteras Federales del País (Promedio Ponderado)

4.1.3 Capacidad y Niveles de Servicio

A partir de la información de capacidad y niveles de servicio integrada al sistema, se obtuvo la Tabla 4.3, la cual presenta las distribuciones de frecuencias de tramos y longitudes dentro de los 6 niveles de servicio considerados por el Manual de Capacidad de Carreteras de los EUA (Referencia 13). La Figura 4.3, por su parte, ilustra los tramos dentro de cada uno de los 6 niveles de servicio. A partir de la Tabla 4.3 y la Figura 4.3 es evidente que la mayoría de la Red considerada opera bajo condiciones de congestión adecuadas (con niveles de servicio C o superior). Sólo en 183 tramos se encontró una operación cercana a la capacidad (4.4% de los tramos que representan 3.5% de la longitud total) y en un tramo, correspondiente a un cruce marítimo en panga en el estado de Veracruz (carretera Gutiérrez Zamora - La Guadalupe), los retrasos reportados son elevados por lo que su nivel de servicio fue clasificado como "F".

Tabla 4.3 **Porciones de la Red por Niveles de Servicio**

| Nivel de Servicio | No. de tramos | % | Longitud de la Red (km) | % |
|--------------------------|----------------------|--------------|--------------------------------|--------------|
| A | 507 | 12.3 | 7,755.0 | 17.1 |
| B | 1,031 | 25.0 | 13,565.5 | 29.9 |
| C | 1,848 | 44.8 | 17,751.0 | 39.0 |
| D | 556 | 13.5 | 4,789.3 | 10.5 |
| E | 183 | 4.4 | 1,573.5 | 3.5 |
| F | 1 | 0.0 | 0.7 | 0.0 |
| TOTAL | 4,126 | 100.0 | 45,435.0 | 100.0 |

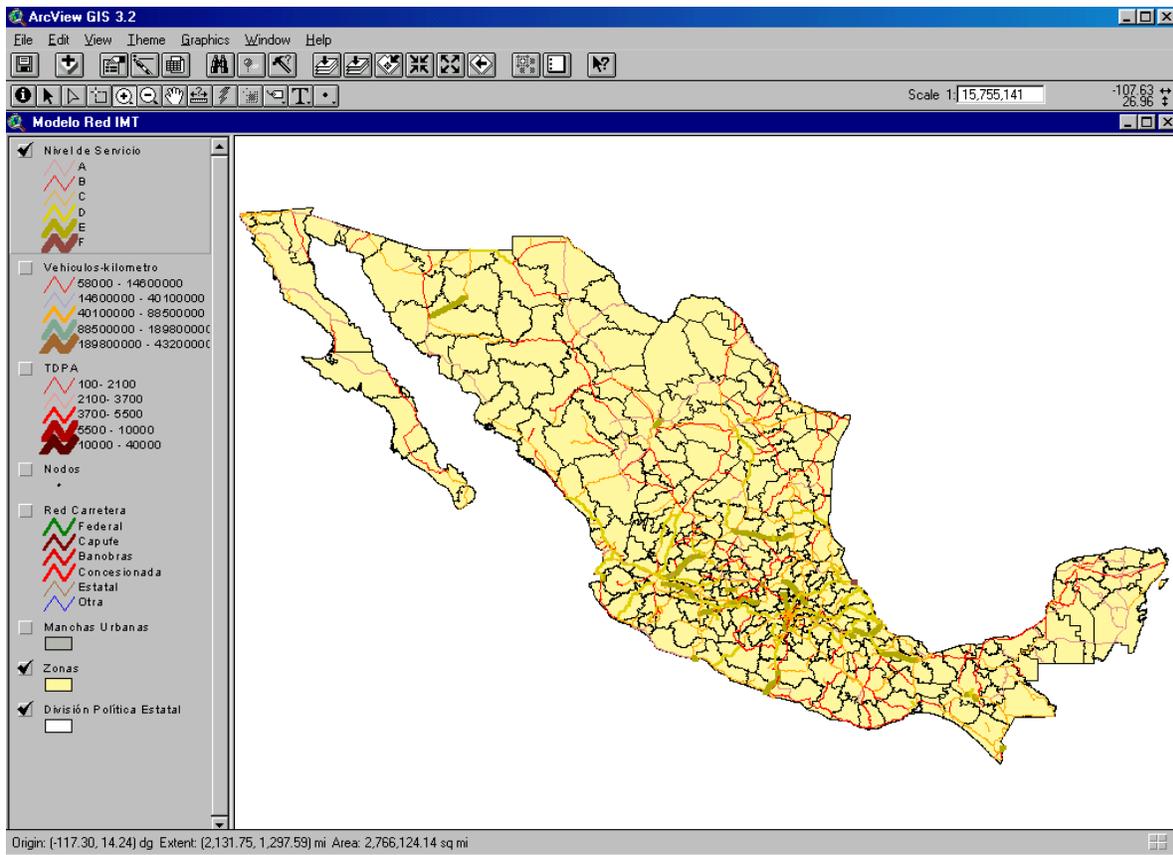


Figura 4.3. Carreteras dentro de los Diferentes Niveles de Servicio (Promedio Ponderado)

4.1.4 Tipo de Terreno

A partir de la información de tipo de terreno para cada tramo de la Red considerada, se obtuvieron la Tabla 4.4 y la Figura 4.4, las cuales clasifican a los tramos según se encuentren en terreno plano, lomerío o montañoso. En la Tabla 4.4 es evidente que un porcentaje muy considerable de la Red (cerca del 70% en términos del número de tramos y de la longitud) se encuentra en terreno de orografía complicada (en lomerío o en terreno montañoso).

4.1.5 Estado del Pavimento

A partir de los datos de Índice Internacional de Rugosidad (IRI) integrados al sistema, se obtuvieron la Tabla 4.5 y la Figura 4.5, las cuales clasifican a los tramos en bueno, regular y malo, según presentaron valores de IRI menores que 4, entre 4 y 8, y mayores que 8, respectivamente.

Tabla 4.4 **Porciones de la Red por Tipo de Terreno**

| Tipo de Terreno | No. de tramos | % | Longitud de la Red (km) | % |
|------------------------|----------------------|--------------|--------------------------------|--------------|
| Plano | 1,342 | 32.5 | 14,288.1 | 31.4 |
| Lomerío | 2,475 | 60.0 | 26,343.5 | 58.0 |
| Montañoso | 309 | 7.5 | 4,803.4 | 10.6 |
| TOTAL | 4,126 | 100.0 | 45,435.0 | 100.0 |

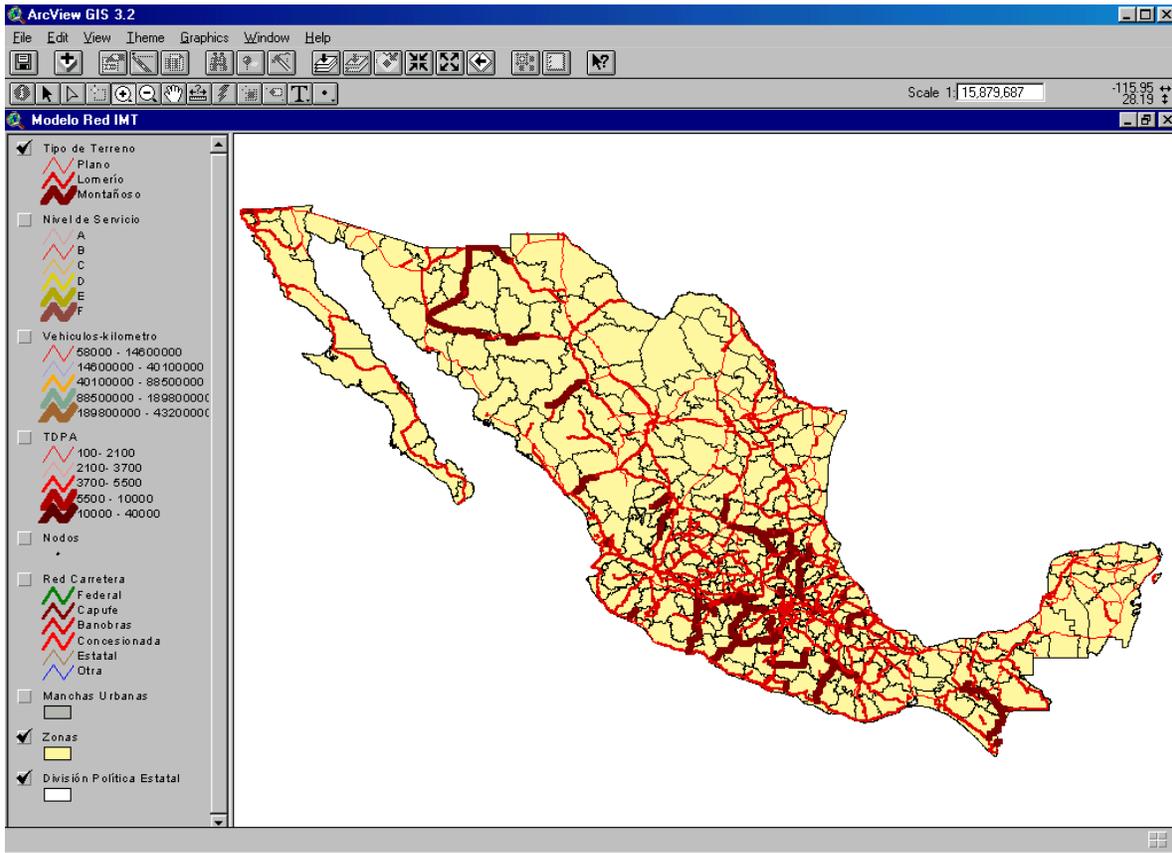


Figura 4.4 Tipo de Terreno en las Diferentes Carreteras Federales del País (Promedio Ponderado)

En la Tabla 4.5 es evidente que un porcentaje muy considerable de la Red (cerca del 90% en términos del número de tramos y de la longitud) se encuentra en condiciones aceptables (estado bueno o regular).

Tabla 4.5 Porciones de la Red por Estado del Pavimento

| Estado del Pavimento | No. de tramos | % | Longitud de la Red (km) | % |
|----------------------------------|---------------|--------------|-------------------------|--------------|
| Bueno (IRI menor que 4) | 1,091 | 26.4 | 13,764.5 | 30.3 |
| Regular (IRI entre 4 y 8) | 2,687 | 65.1 | 26,271.6 | 57.8 |
| Malo (IRI mayor que 8) | 348 | 8.5 | 5,398.9 | 11.9 |
| TOTAL | 4,126 | 100.0 | 45,435.0 | 100.0 |

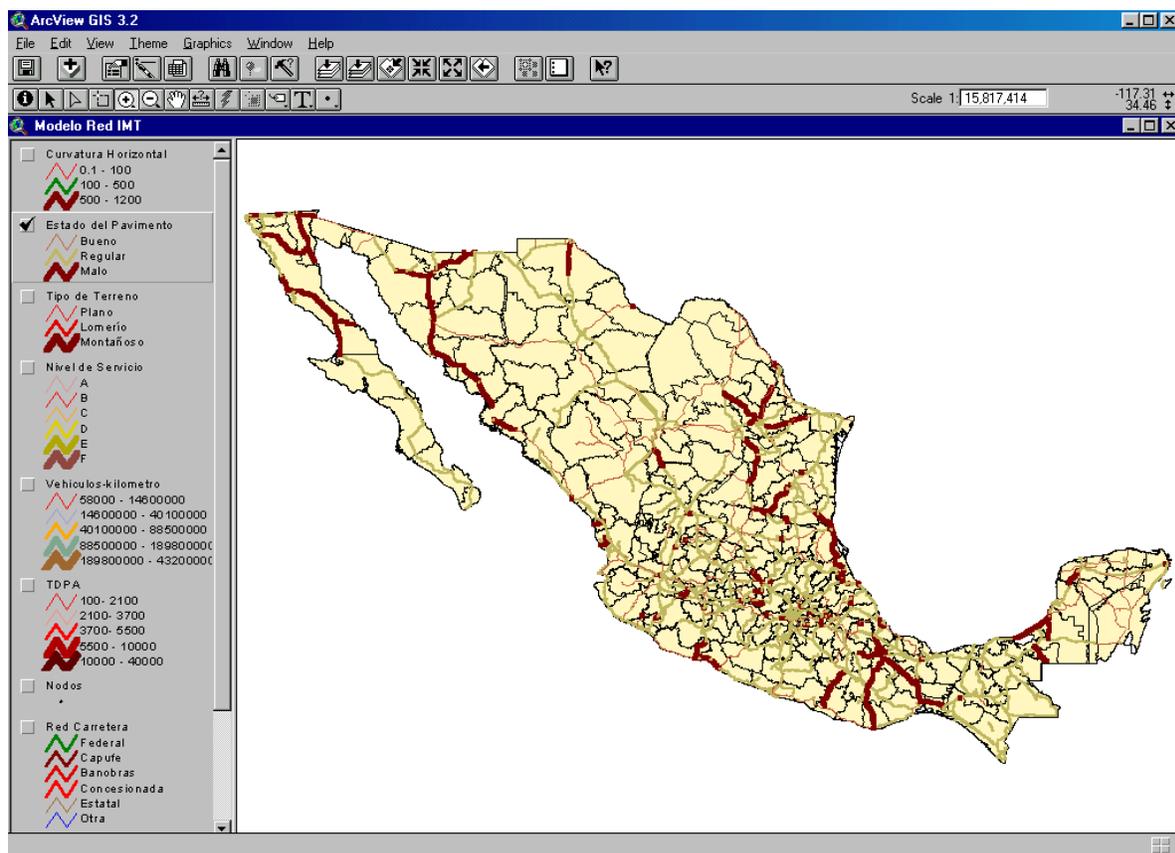


Figura 4.5 Estado del Pavimento en las Diferentes Carreteras Federales del País (Promedio Ponderado)

4.1.6 Curvatura

Después de haber estimado para todos los tramos los cocientes de la suma de los valores absolutos de sus deflexiones entre su longitud (C), según el procedimiento indicado en el capítulo anterior, se procedió a obtener la Tabla 4.6 y la Figura 4.6. Estas clasifican a los tramos de acuerdo con los siguientes tres niveles de curvatura: (I) C menor que $100^{\circ}/\text{Km}$, (II) C entre 100 y $500^{\circ}/\text{Km}$, y (III) C mayor que $500^{\circ}/\text{Km}$. En la Tabla 4.6 es evidente que un porcentaje muy significativo de la Red, tiene valores considerables de C (mayores a $100^{\circ}/\text{Km}$). En la Figura 4.6 es evidente que las mayores curvaturas se presentan en sitios de orografía complicada (zonas serranas).

Tabla 4.6. Porciones de la Red por Niveles de Curvatura Horizontal

| Niveles de Curvatura (C) ($^{\circ}/\text{Km}$) | No. de tramos | % | Longitud de la Red (km) | % |
|---|---------------|--------------|-------------------------|--------------|
| Menor de 100 | 2,305 | 55.9 | 14,681.5 | 32.3 |
| Entre 100 y 500 | 1,811 | 43.9 | 30,446.1 | 67.0 |
| Mayor de 500 | 10 | 0.2 | 307.4 | 0.7 |
| TOTAL | 4,126 | 100.0 | 45,435.0 | 100.0 |

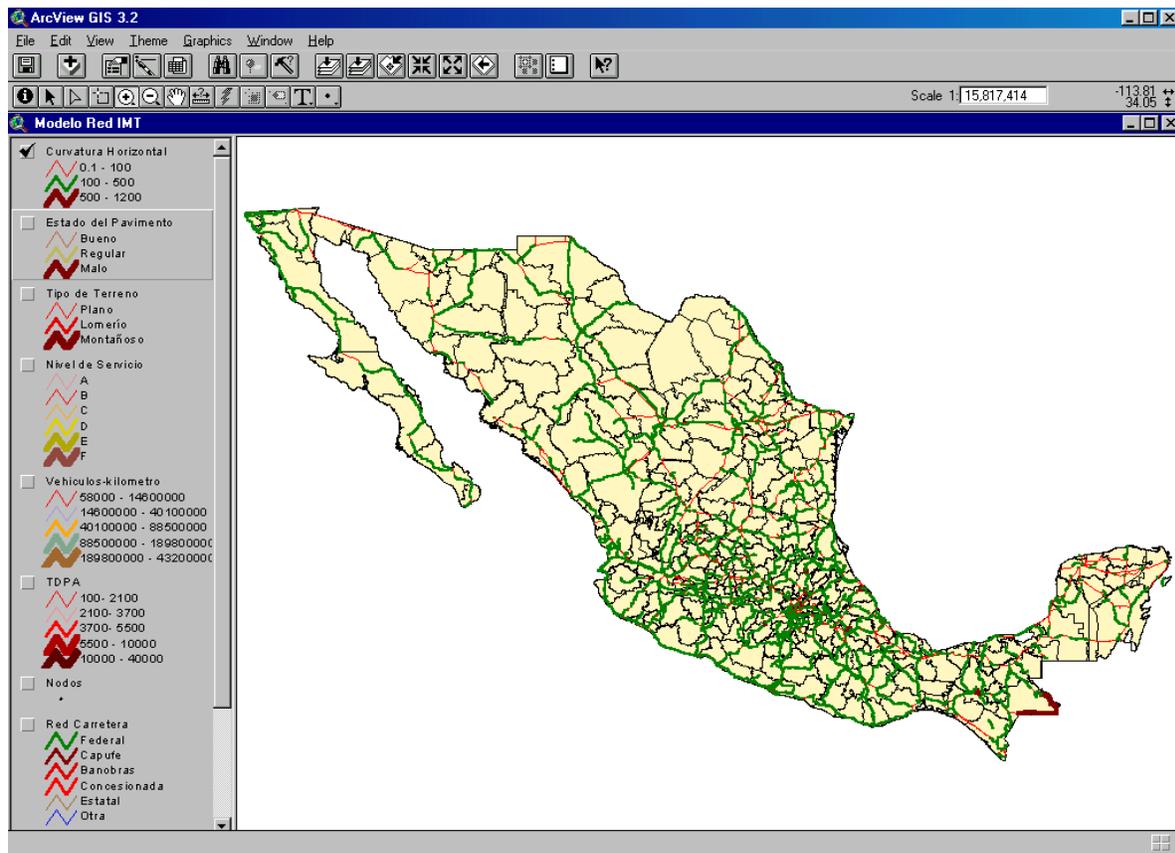


Figura 4.6 Niveles de Curvatura Horizontal en las Diferentes Carreteras Federales del País (Promedio Ponderado)

4.1.7 Otros Resultados de este Tipo

Con el sistema generado es posible obtener, directamente de otros datos integrados al sistema, tablas y figuras similares a las mostradas anteriormente para algunos de esos datos. De esta manera, sería posible generar tablas y figuras en relación con las cuotas cobradas en puentes y autopistas de cuota, los límites de velocidad, los COV's por kilómetro, por tramo, etc.

4.2 Otros Resultados a Partir de Procesos más Elaborados.

4.2.1 COV Totales del Flujo de Vehículos de Carga (CTF) y por Tonelada-Kilómetro (TK)

A partir de la información en la segmentación por tramos sobre (I) flujo diario de los diferentes tipos de vehículos de carga y sus pesos brutos vehiculares promedio con que circulan por las carreteras y sus correspondientes porcentajes de llenado en la Tabla 4.7 (Referencia 22), (II) COV del T3-S2 vacío y a plena carga para ambos sentidos de circulación, (III) los peajes en las autopistas y puentes de cuota para las distintas configuraciones y (IV) los factores de relación del COV de las diferentes configuraciones en relación con el T3-S2 (Tabla 3.3 en el Capítulo 3), se aproximaron los COV totales del flujo de vehículos de carga (CTF) a través de cada tramo mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 \text{CTF} = & \left[0.529 \times \left(\text{TDPA} \times \frac{\%C2}{100} \right) \times \left(\text{CV} + \frac{\%LC2}{100} (\text{CL} - \text{CV}) + \text{CuoC2} \right) \right] + \\
 & \left[0.569 \times \left(\text{TDPA} \times \frac{\%C3}{100} \right) \times \left(\text{CV} + \frac{\%LC3}{100} (\text{CL} - \text{CV}) + \text{CuoC3} \right) \right] + \\
 & \left[1.000 \times \left(\text{TDPA} \times \frac{\%T3S2}{100} \right) \times \left(\text{CV} + \frac{\%LT3S2}{100} (\text{CL} - \text{CV}) + \text{CuoT3S2} \right) \right] + \\
 & \left[1.062 \times \left(\text{TDPA} \times \frac{\%T3S3}{100} \right) \times \left(\text{CV} + \frac{\%LT3S3}{100} (\text{CL} - \text{CV}) + \text{CuoT3S3} \right) \right] + \\
 & \left[1.265 \times \left(\text{TDPA} \times \frac{\%T3S2R4}{100} \right) \times \left(\text{CV} + \frac{\%LT3S2R4}{100} (\text{CL} - \text{CV}) + \text{CuoT3S2R4} \right) \right] \dots\dots\dots \text{Ec. 4.1}
 \end{aligned}$$

en la que:

CTF, es el COV total del flujo diario de vehículos de carga en el tramo (US\$);

TDPA, es el Tránsito Diario Promedio Anual (vehículos);

%C2, es el porcentaje de vehículos C2 en la composición vehicular;

Tabla 4.7
Porcentajes Promedio de Llenado de las
Diferentes Configuraciones

| Tipo de Vehículo | PBV Promedio (Ton) | Tara (Ton) | Carga Promedio (Ton) | Tonelaje Máximo de Carga | % de Llenado |
|-------------------------|---------------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------|
| C2 | 7.7 | 4.1 | 3.6 | 13.4 | 26.9 |
| C3 | 16.4 | 8.3 | 8.1 | 17.7 | 45.8 |
| T3-S2 | 28.4 | 15.2 | 13.2 | 28.8 | 45.8 |
| T3-S3 | 39.7 | 18.8 | 20.9 | 29.7 | 70.4 |
| T3-S2-R4 | 54.0 | 23.9 | 30.1 | 42.6 | 70.7 |

%LC2, es el porcentaje de llenado promedio del vehículo C2;

%LC3, es el porcentaje de llenado promedio del vehículo C3;

%LT3S2, es el porcentaje de llenado promedio del vehículo T3S2;

%LT3S3, es el porcentaje de llenado promedio del vehículo T3S3;

%LT3S2R4, es el porcentaje de llenado promedio del vehículo T3S2R4;

CuoC2, es el peaje para el vehículo C2 en el tramo (US\$);

CuoC3, es el peaje para el vehículo C3 en el tramo (US\$);

CuoT3S2, es el peaje para el vehículo T3S2 en el tramo (US\$);

CuoT3S3, es el peaje para el vehículo T3S3 en el tramo (US\$); y

CuoT3S2R4, es el peaje para el vehículo T3S2R4 en el tramo (US\$).

Así mismo a partir de la información en la misma segmentación sobre (I) flujo diario de los diferentes tipos de vehículos de carga y sus correspondientes tonelajes promedio de carga transportados en la Tabla 4.7 y (II) longitud de los

tramos, se obtuvieron las toneladas-kilómetro de carga (TK) circulando diariamente por cada tramo mediante la siguiente expresión:

$$TK = \left[\begin{array}{l} (\%C2 \times PC2) + (\%C3 \times PC3) + (\%T3S2 \times PT3S2) + \\ (\%T3S3 \times PT3S3) + (\%T3S2R4 \times PT3S2R4) \end{array} \right] \times \frac{TDPA}{100} \times \frac{LAV}{1000} \dots\dots Ec.4.2$$

donde:

TK, son las toneladas-kilómetro de carga circulando diariamente por el tramo;
 PC2, es el tonelaje promedio de carga transportado por el vehículo C2;
 PC3, es el tonelaje promedio de carga transportado por el vehículo C3;
 PT3S2, es el tonelaje promedio de carga transportado por el vehículo T3S2;
 PT3S3, es el tonelaje promedio de carga transportado por el vehículo T3S3;
 PT3S2R4, es el tonelaje promedio de carga transportado por el vehículo T3S2R4;
 LAV, es la longitud del tramo en metros; y
 las demás variables son como ya fueron definidas.

Los dos valores anteriores (CTF y TK) para todos los tramos fueron calculados con Visual Fox Pro (Referencia 10), a partir de la información en un archivo en formato DBASE obtenido de la exportación de la tabla de atributos de la segmentación por tramos. Una vez obtenidos esos valores en dicho archivo, éste fue vinculado de vuelta a la tabla de atributos de la segmentación anterior. Como resultado de la agregación en ArcView de esos valores para todos los tramos, se obtuvo que por la Red modelada se genera un CTF de 41'598,991 de dólares por día en la transportación diaria de 340'452,427 toneladas-kilómetro de carga. Las cifras anteriores representan un CTF/TK promedio de 0.122 dólares/tonelada-kilómetro, el cual resulta 30% por debajo de su correspondiente valor promedio reportado para Estados Unidos (Referencia 28) y 20% por encima del de Canadá (Referencia 29).

4.2.2 Identificación de Corredores Prioritarios para Modernización

Criterios

El sistema generado también permite identificar los corredores prioritarios para el autotransporte nacional de carga, a ser modernizados en el futuro cercano. Lo anterior es posible si se utilizan combinadamente las potencialidades del sistema manejado con ArcView y su Módulo de Redes de ArcView, junto con información existente de origen a destino (O-D) de los viajes del autotransporte de carga como la que se muestra en la Tabla 4.8 (Referencia 30). Esta última proviene de estaciones de encuesta O-D de vehículos de carga instaladas durante las 24 horas de todos los días de una semana determinada, en diferentes sitios de la Red Carretera Federal (Referencia 22). La Tabla 4.8 muestra los 40 pares O-D que, según la información recopilada en las estaciones instaladas en los años más recientes (1999 y 2000), observan mayores flujos de vehículos de carga por día. Como es evidente a partir de la última columna de la tabla, los 40 pares O-D en ella comprenden 23.15% del total de viajes del autotransporte de carga.

La identificación de corredores más importantes a modernizar puede efectuarse con base en los siguientes tres criterios:

- 1 La minimización del costo de modernización o construcción (CM). En este caso, la red de corredores queda definida por el árbol de expansión mínima (AEM) (Referencia 31) que conecte a todas las poblaciones que se deseen comunicar entre sí. Esta solución, en contraparte, hace caso omiso de lo que pudiese ser más conveniente desde el punto de vista de la minimización de los COV's.

Tabla 4.8 Pares O-D con Mayor Flujo Diario de Vehículos de Carga

| No. | P A R E S | | | | VEH./DIA | % DEL TOTAL NACIONAL | % ACUMULADO |
|-----|----------------|-------|----------------|-------|----------------|----------------------------|----------------|
| | ORIGEN | | DESTINO | | | | |
| | POBLACION | CLAVE | POBLACION | CLAVE | | | |
| 1 | NUEVO LAREDO | TMS03 | MEXICO | DF01 | 1,991 | 1.71 | 1.71 |
| 2 | MEXICO | DF01 | TOLUCA | MEX01 | 1,630 | 1.40 | 3.11 |
| 3 | TOLUCA | MEX01 | MEXICO | DF01 | 1,624 | 1.40 | 4.51 |
| 4 | HERMOSILLO | SON01 | HERMOSILLO | SON01 | 1,180 | 1.02 | 5.53 |
| 5 | TIJUANA | BCN04 | ENSENADA | BCN03 | 980 | 0.84 | 6.37 |
| 6 | MEXICO | DF01 | PUEBLA | PUE01 | 960 | 0.83 | 7.19 |
| 7 | MEXICO | DF01 | GUADALAJARA | JAL01 | 952 | 0.82 | 8.01 |
| 8 | ENSENADA | BCN03 | TIJUANA | BCN04 | 928 | 0.80 | 8.81 |
| 9 | CD. JUAREZ | CHI05 | CHIHUAHUA | CHI01 | 811 | 0.70 | 9.51 |
| 10 | GUADALAJARA | JAL01 | MEXICO | DF01 | 794 | 0.68 | 10.19 |
| 11 | MONTERREY | N L01 | NUEVO LAREDO | TMS03 | 784 | 0.67 | 10.87 |
| 12 | CHIHUAHUA | CHI01 | CD. JUAREZ | CHI05 | 782 | 0.68 | 11.54 |
| 13 | MEXICO | DF01 | NUEVO LAREDO | TMS03 | 770 | 0.66 | 12.2 |
| 14 | MEXICO | DF01 | VERACRUZ | VER02 | 763 | 0.66 | 12.86 |
| 15 | PUEBLA | PUE01 | MEXICO | DF01 | 763 | 0.66 | 13.52 |
| 16 | MONTERREY | N L01 | MEXICO | DF01 | 740 | 0.64 | 14.15 |
| 17 | NUEVO LAREDO | TMS03 | MONTERREY | N L01 | 719 | 0.62 | 14.77 |
| 18 | MEXICO | DF01 | MONTERREY | N L01 | 694 | 0.60 | 15.37 |
| 19 | MEXICO | DF01 | VILLAHERMOSA | TAB01 | 650 | 0.56 | 15.93 |
| 20 | VERACRUZ | VER02 | MEXICO | DF01 | 634 | 0.55 | 16.47 |
| 21 | GUADALAJARA | JAL01 | ZAPOTLANEJO | JAL07 | 487 | 0.42 | 16.89 |
| 22 | MEXICO | DF01 | QUERETARO | QRO01 | 472 | 0.41 | 17.30 |
| 23 | ZAPOTLANEJO | JAL07 | GUADALAJARA | JAL01 | 441 | 0.38 | 17.68 |
| 24 | GUADALAJARA | JAL01 | TEPATITLAN | JAL04 | 440 | 0.38 | 18.06 |
| 25 | NOGALES | SON06 | HERMOSILLO | SON01 | 437 | 0.38 | 18.43 |
| 26 | MEXICO | DF01 | SN LUIS POTOSI | SLP01 | 425 | 0.37 | 18.80 |
| 27 | TEPATITLAN | JAL04 | GUADALAJARA | JAL01 | 420 | 0.36 | 19.16 |
| 28 | SN LUIS POTOSI | SLP01 | MEXICO | DF01 | 407 | 0.35 | 19.51 |
| 29 | QUERETARO | QRO01 | MEXICO | DF01 | 376 | 0.32 | 19.84 |
| 30 | SAHUAYO | MIC04 | JIQUILPAN | MIC06 | 367 | 0.32 | 20.15 |
| 31 | CUITZEO | MIC11 | MORELIA | MIC01 | 363 | 0.31 | 20.46 |
| 32 | JIQUILPAN | MIC06 | SAHUAYO | MIC04 | 361 | 0.31 | 20.77 |
| 33 | VILLAHERMOSA | TAB01 | MEXICO | DF01 | 361 | 0.31 | 21.08 |
| 34 | MORELIA | MIC01 | CUITZEO | MIC11 | 355 | 0.31 | 21.39 |
| 35 | MONTERREY | N L01 | GUADALAJARA | JAL01 | 355 | 0.31 | 21.69 |
| 36 | OAXACA | OAX01 | TELIXTLAHUACA | OAX10 | 352 | 0.30 | 22.00 |
| 37 | MEXICO | DF01 | COATZACOALCOS | VER24 | 341 | 0.29 | 22.29 |
| 38 | HERMOSILLO | SON01 | NOGALES | SON06 | 334 | 0.29 | 22.58 |
| 39 | GUADALAJARA | JAL01 | EL SALTO | JAL05 | 332 | 0.29 | 22.86 |
| 40 | COATZACOALCOS | VER24 | MEXICO | DF01 | 329 | 0.28 | 23.15 |
| | OTROS | | | | 89,308 | 76.15 | 100.00 |
| | TOTAL | | | | 116,212 | 100.00 | |

- 2 La minimización de COV's. Bajo este enfoque se trata de conectar a todas las poblaciones de interés, privilegiando la implementación de líneas de comunicación directas entre los pares O-D de mayor flujo. Por lo tanto, la red de corredores a modernizar queda definida fundamentalmente por el juego de caminos más cortos (de menor COV) entre los pares O-D de mayor importancia. La determinación de caminos más cortos entre dos sitios determinados de una red dada, así como sus correspondientes distancia o COV mínimos, es uno de los problemas que pueden resolverse con el Módulo de Redes de ArcView, obviamente si se cuenta con el sistema de COV's en todos los arcos de la red, como es el caso ahora en este trabajo. En contraparte, esta solución no garantiza la conectividad entre todas las poblaciones de interés.
- 3 Otro adicional que fuese la combinación de los dos anteriores y que por lo mismo favoreciese la minimización de COV's, garantizando al mismo tiempo la conectividad de todas las poblaciones de interés. En este caso el enfoque más razonable sería complementar la red obtenida según el criterio 2, con elementos de la obtenida según el criterio 1 para completar la comunicación de todas las poblaciones de interés (conectividad de la red).

Ejemplo de Aplicación

Como ejemplo de la aplicación de los tres criterios anteriores se presenta la Figura 4.7, la cual muestra el AEM para las 12 poblaciones involucradas en los 14 primeros pares O-D de la Tabla 4.8. Este AEM resulta con una longitud total de 4,428 kilómetros que si se multiplica por un costo promedio de modernización de 500 mil dólares por kilómetro, da un costo total de modernización (CM) de 2,214 millones de dólares. Por otra parte, obteniendo con el Módulo de Redes de ArcView los caminos más cortos sobre este AEM entre cada uno de los 14 primeros pares O-D de la Tabla 4.8 así como sus COV's y agregando la multiplicación de éstos por sus flujos correspondientes en la Tabla 4.8 (antepenúltima columna de la tabla) y por 365 días por año, se obtiene un COV total anual de 4,279 millones de dólares. Por lo tanto, la implementación del criterio 1 representa un costo total durante el primer año ($CT = CM + COV$) de 6,493 millones de dólares. Las cifras antes obtenidas indican que para un horizonte de análisis de un año, el COV prevalece por encima del CM. Obviamente, para mayores horizontes de análisis, el predominio del COV sobre el CM tendería a hacerse mayor.

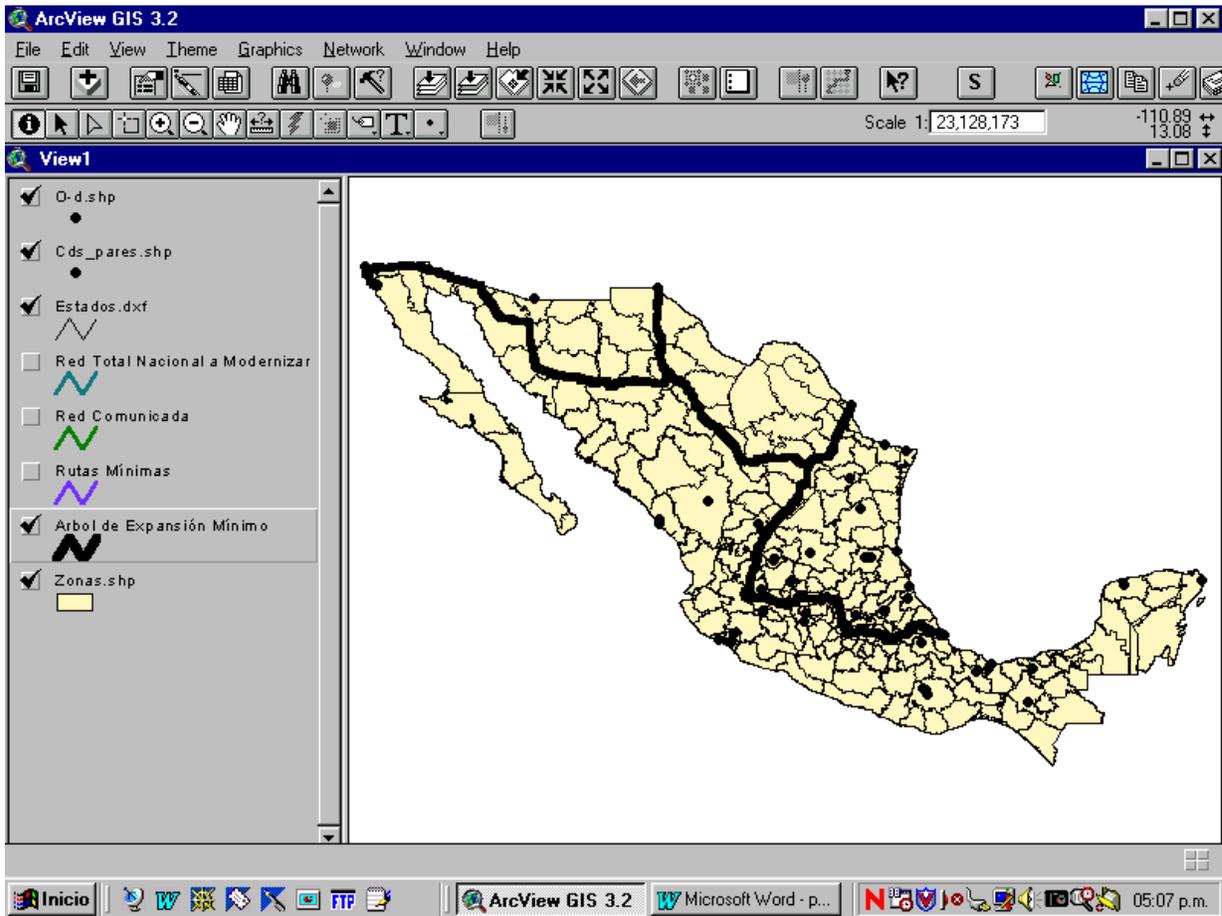


Figura 4.7 Red Obtenida a partir de la Minimización de Costos de Modernización o Construcción (AEM)

La Figura 4.8 ilustra la red que se obtiene, atendiendo al criterio 2, si se conectan entre sí a través de sus caminos más cortos los 14 pares O-D considerados. Como es evidente en la figura, esta red no tiene conectividad total.

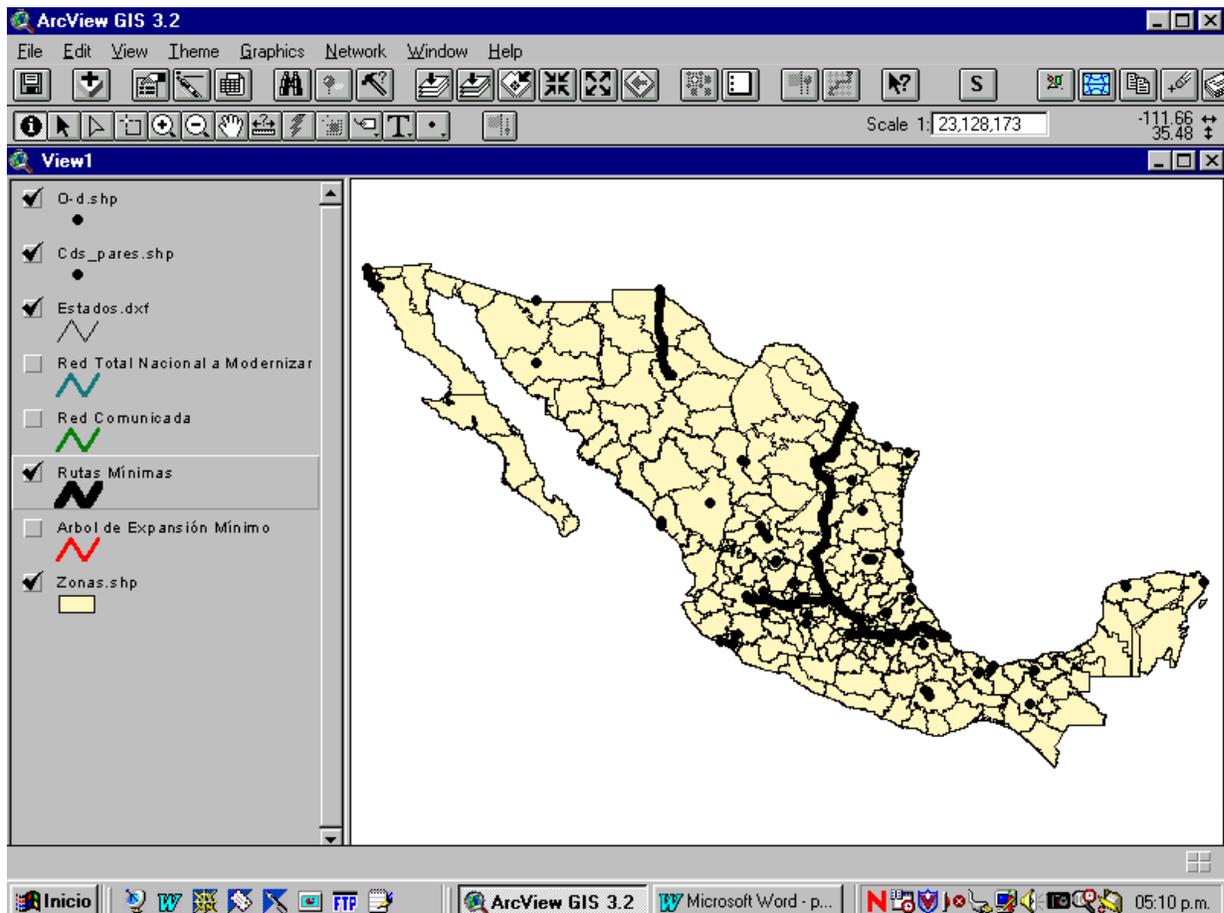


Figura 4.8 Red Obtenida a partir de la Minimización de los COV's (con la Red Obtenida del Criterio Anterior)

La Figura 4.9 ilustra la red completamente conectada que se obtiene de aplicar el criterio 3. Esta solución tiene una longitud total de 4,948 kilómetros que si se multiplica por el costo promedio de modernización por kilómetro de 500 mil dólares, da un costo total de modernización (CM) de 2,474 millones de dólares. Por otra parte, para la circulación de los flujos de los 14 primeros pares O-D de la Tabla 4.8 se obtiene un COV total de 3,417 millones de dólares. Por lo tanto, la implementación de esta solución representa un costo total (CT) de 5,891 millones de dólares. Como es evidente, en este caso el COV también prevalece por encima del CM. Esta solución tiene un CT menor que el obtenido del criterio 1, por ser más congruente con la minimización de COV's, que es el componente predominante del CT.

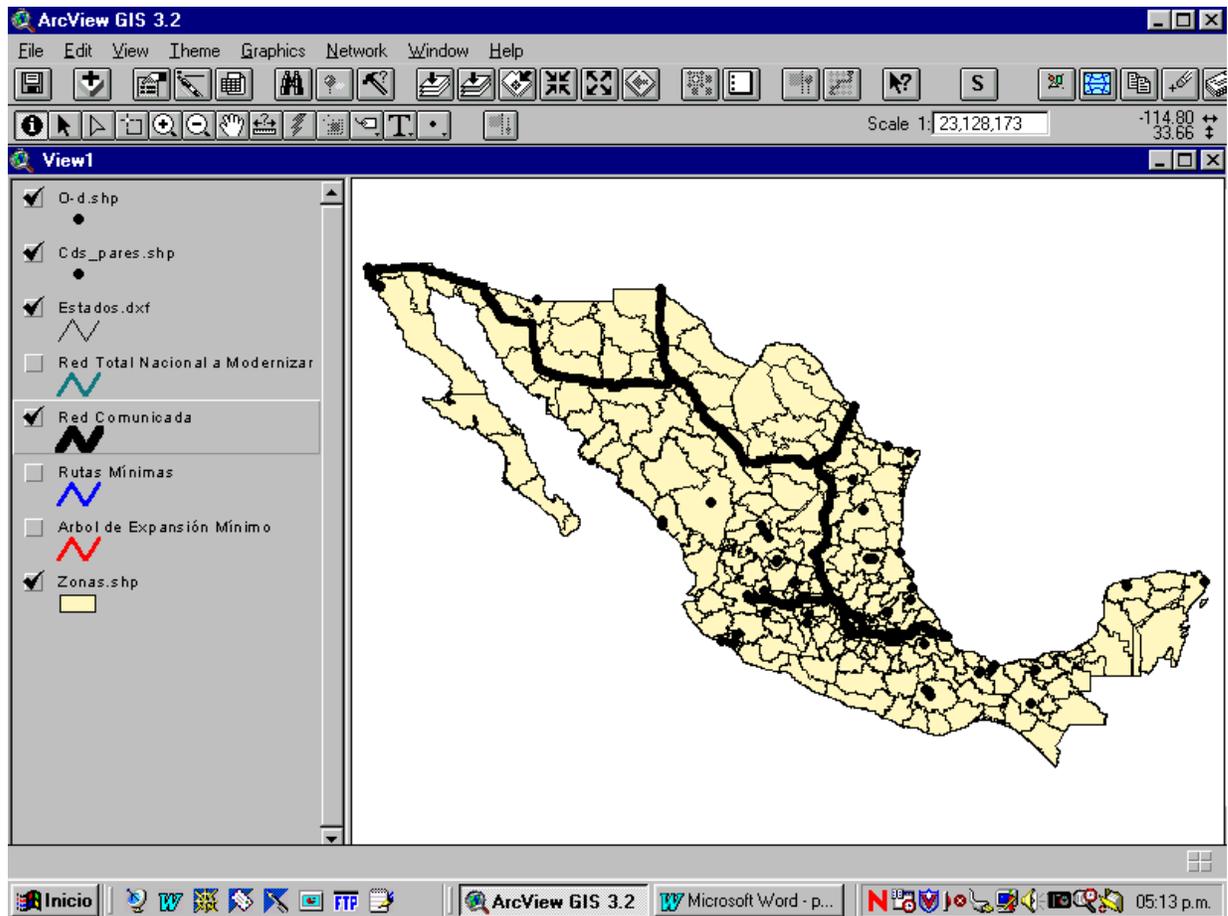


Figura 4.9 Red Obtenida a partir de la Combinación de los Dos Criterios Anteriores (Minimización de COV's y del Costo de Modernización)

La gráfica en la Figura 4.10 presenta la evolución de CM, COV y CT para las longitudes totales de red obtenidas para los criterios 1 y 3. La línea de CT en la gráfica reitera la conveniencia de favorecer los pares O-D de mayor importancia al definir la red a modernizar.

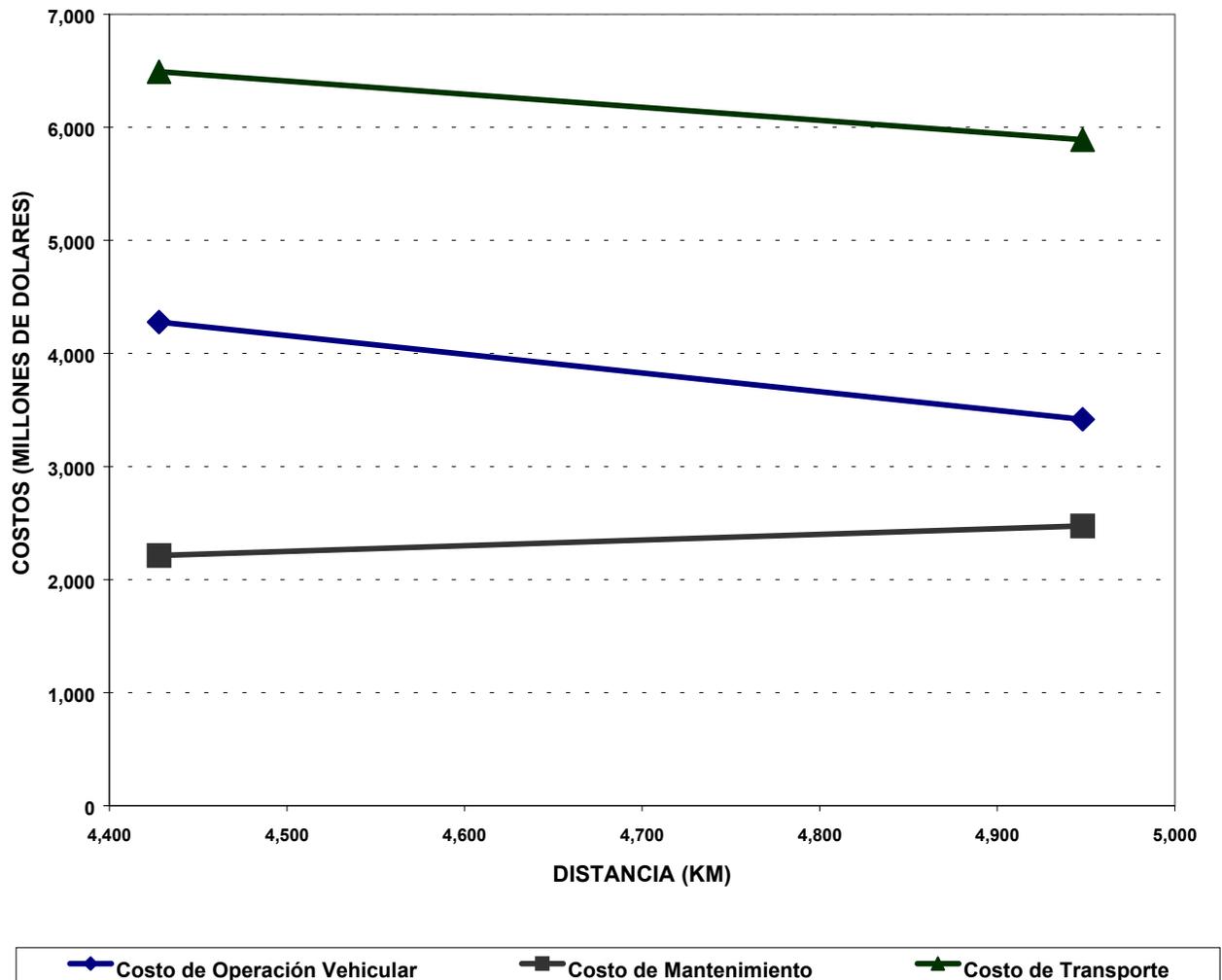


Figura 4.10 Gráfica Comparativa de Costos para los Criterios 1 y 3

Red Total Nacional a Modernizar

La Figura 4.11 ilustra la fracción primordial de la Red Carretera Federal, a ser modernizada; ésta fue obtenida de aplicar las recomendaciones antes generadas (criterio 3), considerando a su vez los 132 pares O-D de mayor flujo de vehículos de carga reportados en la Referencia 30. Estos pares comprenden 40.0% del total nacional de viajes del autotransporte de carga.

La red obtenida en la Figura 4.11 tiene una extensión de 30,153 kilómetros y puede considerarse como congruente con el Programa de Modernización de Ejes Carreteros de la SCT (Referencia 32).

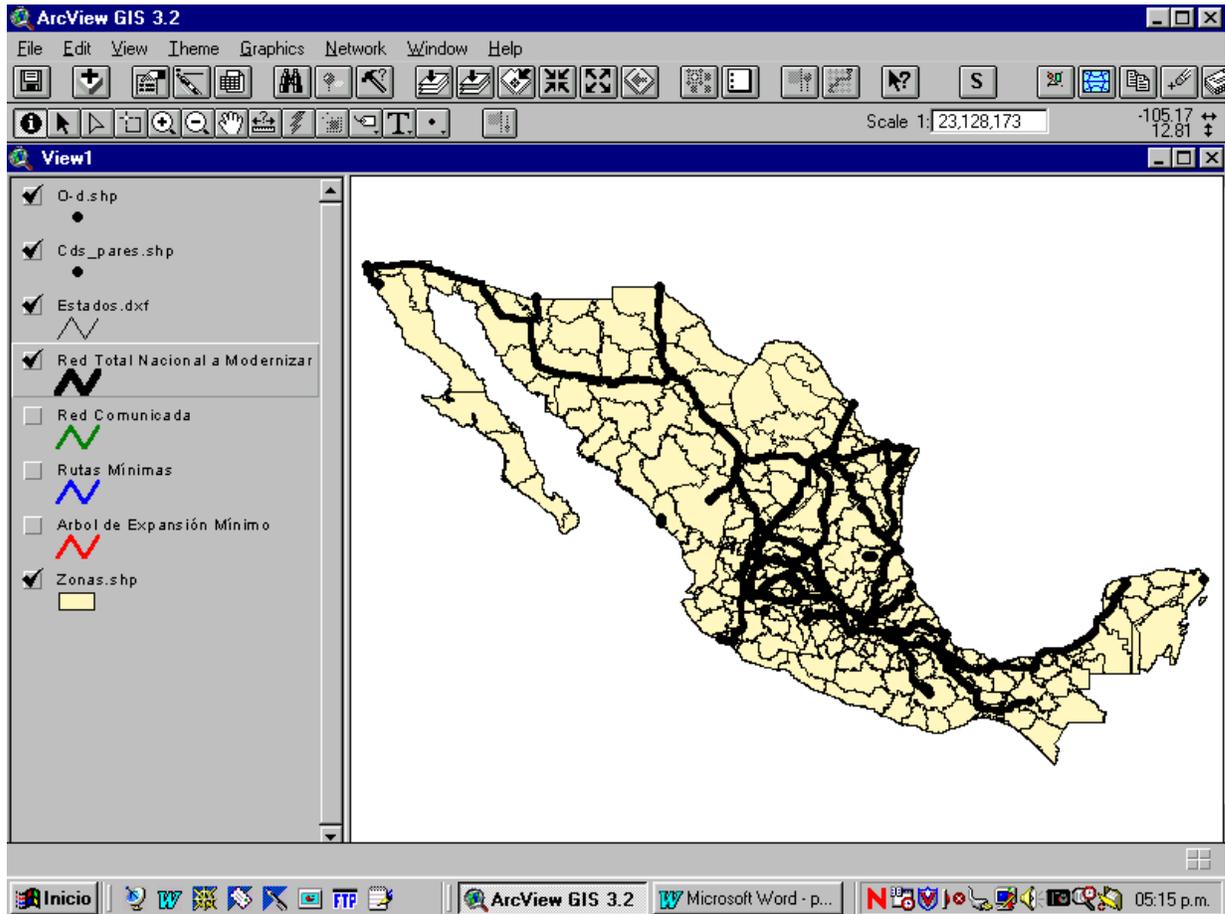


Figura 4.10 Ejemplo de Red Total Nacional a Modernizar

5 Conclusiones

5.1 Conclusiones

Las conclusiones más importantes derivadas de este trabajo son:

- De manera similar que en un estudio previo realizado sólo para las Carreteras Federales del Estado de Veracruz (Referencia 1), se reconoce que la estimación de costos de operación vehicular (COV) en este trabajo no considera algunos factores (externalidades) que pueden ser importantes. El más importante de ellos es el costo por accidentes. Al respecto, se tienen evidencias de que la circulación por alternativas de cuota es más segura (en términos del índice de costo de accidentes por vehículo-kilómetro recorrido) que por alternativas libres (Referencia 33).
- El sistema generado permite desplegar, a nivel de tramos de la Red Carretera Federal, diferentes tipos de información sobre el estado de los mismos (aforo, nivel de servicio, tipo de terreno, IRI, curvatura, cuotas y costos de operación vehicular). En este sentido, puede ser una herramienta útil para diferentes tipos de gestión de mejoramiento de la Red.
- Se obtiene que por la Red Carretera Federal se genera un COV promedio de 0.122 dólares/tonelada-kilómetro transportada, el cual es 30% menor que su correspondiente valor para los Estados Unidos y 20% superior al de Canadá. Lo anterior evidencia que el COV del autotransporte de México es competitivo en relación con el de los otros dos países, aunque otros componentes del costo de transporte (aseguramiento de vehículos y carga) pueden restarle competitividad a los productos nacionales.
- Con base al sistema generado, se analizan distintos criterios de identificación de corredores prioritarios. Se obtiene que el más conveniente de ellos es el que resulta en la subred que privilegia a los recorridos más directos entre los pares origen-destino (O-D) más importantes y, a su vez, logra la conectividad entre los sitios más importantes del país.
- El sistema generado apoya las labores de planeación, investigación y toma de decisiones por parte del Sector Transporte. Genera información de utilidad para los administradores y operadores de la infraestructura. Permite a los autotransportistas conocer sus costos operativos, como apoyo a la programación de sus actividades.

5.2 Recomendaciones

Las recomendaciones más importantes son:

- Los procesos de organización, planeación y gestión del transporte deben realizarse utilizando las tecnologías más modernas y eficientes de manejo de información. Por tal razón, se recomienda seguir utilizando los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los sistemas de Posicionamiento Global (GPS), que son herramientas que pueden seguirse explorando y adecuando a las necesidades específicas del transporte por su versatilidad para la administración, evaluación y análisis de gran cantidad de datos referenciados geográficamente.
- Se recomienda ampliar los análisis de identificación de corredores, considerando la información O-D más completa y reciente posible.

Referencias

- 1 Aburto A. y Mendoza A. *SIG para el Análisis de Costos de Operación de Vehículos de Carga en Carreteras Federales. Caso Estado de Veracruz*, Publicación Técnica No. 153, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Qro., 2000.
- 2 *The Highway Design and Maintenance Standards Series, VOC Model, Version 3.0*. The World Bank, Washington, D.C., U.S.A., 1989.
- 3 *ArcView GIS, Version 3.2. The Geographic Information System for Everyone*. Environmental Systems Research Institute, U.S.A., 1997.
- 4 *ArcView Network Analyst. Optimum Routing, Closest Facility and Service Area Analysis*. Environmental Systems Research Institute, U.S.A., 1998.
- 5 Backhoff P., Miguel A., Tristán Ruiz Lang y Juan Carlos Vázquez Paulín. *Sistema de Información GeoEstadística para el Transporte (SIGET)*, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Qro., 1999.
- 6 *Sistema de Clasificación de las Carreteras Federales*. Dirección General de Servicios Técnicos (DGST), Subsecretaría de Infraestructura, Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), México, D.F., 2000.
- 7 Memorias del IV Congreso Latinoamericano de Usuarios del Arclnfo y Erdas. México D. F., noviembre de 1996.
- 8 García O., Gabriela y Miguel A. Backoff P. *Los Sistemas de Información Geográfica y el Transporte*. Publicación Técnica No. 32, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Qro., 1992.
- 9 ArcInfo GIS, Environmental System Research Institute, Inc., U.S.A., 1998.
- 10 Sistema de Programación de Bases de Datos Relacionales, Visual FoxPro, Versión 5.0, Microsoft Corporation, Inc., 1998.
- 11 Excel, Versión 5.0, Microsoft Corporation, Inc., 2000.

- 12 Datos Viales 2000, Dirección General de Servicios Técnicos, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, D. F., 2001.
- 13 Highway Capacity Manual (Manual de Capacidad de Carreteras), Special Report 209, Transportation Research Board. National Research Council, Washington, D. C., U.S.A., 1985.
- 14 Capacidad y Niveles de Servicio en la Red Federal de Carreteras, Dirección General de Servicios Técnicos, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, D. F., 1998.
- 15 Índice Internacional de Rugosidad para las Carreteras Federales, Dirección General de Servicios Técnicos, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, D. F., 2000.
- 16 Haas R., y W. R. Hudson. Pavement Management Systems, Robert E. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, U.S.A., 1982.
- 17 Cuotas en Puentes y Autopistas de Cuota 2001. Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Conexos (CAPUFE). <http://www.capufe.gob.mx>
- 18 Unidad de Autopistas de Cuota. <http://www.sct.gob.mx>
- 19 “Sistema de Ciudades y Distribución de la Población en México”, Consejo Nacional de Población (CONAPO), 2000.
- 20 Reglamento de Tránsito de Carreteras Federales. Presidencia de la República, 1976.
- 21 Chavarría V., J. M., A. Mendoza D. y E. Mayoral G. *Algunas Medidas para Mejorar la Seguridad Vial en las Carreteras Nacionales*. Publicación Técnica No. 89, Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Qro., 1996.
- 22 Gutiérrez H., J. L., A. Mendoza D. y P. Dontchev K. *Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional. Análisis Estadístico de la Información Recopilada en las Estaciones Instaladas en 1995 y 1996*. Documento Técnico No. 20, Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Qro., 1999.

- 23 Mendoza D., A. y J. G. Reyes G. *Estudio de Pesos y Dimensiones de los Vehículos que Circulan Sobre las Carreteras Nacionales. Impactos Económicos de la Reglamentación y el Control de Pesos*. Publicación Técnica No. 51, Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Qro., 1994.
- 24 *Reglamento Sobre el Peso, Dimensiones y Capacidad de los Vehículos de Autotransporte que Transitan en los Caminos y Puentes de Jurisdicción Federal*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, D.F., 1997.
- 25 Aguerrebere S., R. y F. Cepeda N. *Elementos de Proyecto y Costos de Operación en Carreteras*. Publicación Técnica No. 20, Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Qro., 1991.
- 26 Aguerrebere S., R. y F. Cepeda N. *Estado Superficial y Costos de Operación en Carreteras*. Publicación Técnica No. 30, Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Qro., 1991.
- 27 Arriaga P., M. C. *Indice Internacional de Rugosidad, Aplicación en la Red Carretera de México*. Publicación Técnica No. 108, Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Qro., 1998.
- 28 *National Transportation Statistics 1999*. Bureau of Transportation Statistics, US Department of Transportation (<http://206.4.84.245/btsproducts/category.cfm?Category=102>).
- 29 *Transportation Statistics Report 1999*. Transport Canada. (<http://www.tc.gc.ca/en/menu.htm>).
- 30 Rico R., Alfonso., A. Mendoza D. y M. Mayoral G. *Una Aproximación a la Definición de los Principales Corredores de Transporte Terrestre en México*. Documento Técnico No. 94, Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Qro., 2000.

- 31 Larson, Richard C. y Amedeo R. Odón. *Investigación de Operaciones Urbana (en Inglés)*. Instituto Tecnológico de Massachussetts. Prentice Hall, Inc., 1981.
- 32 *Modernización del Sistema Carretero Troncal*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, D.F., 1998.
- 33 Uribe M., Aristóteles, Francisco L. Quintero P., Alberto Mendoza D., Claudia Z. Gil A., y Jesús M. Cavaría V. *Sistema para la Administración de la Información de Accidentes en Carreteras Federales (SAIACF)*. Documento Técnico No. 138, Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Qro., 2000.



CIUDAD DE MEXICO

Av. Patriotismo 683
Col. Mixcoac
03730, México, D. F.
Tel (55) 56 15 35 75
55 98 52 18
Fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

Km. 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro.
Tel (442) 2 16 97 77
2 16 96 46
Fax (442) 2 16 96 71

Internet: <http://www.imt.mx>
publicaciones@imt.mx