



Certificación ISO 9001:2015 ‡

DESARROLLO DE UN MODELO NACIONAL DE TRANSPORTE SEGUNDA FASE: ACTUALIZACIÓN DE DATOS Y ANÁLISIS DE ESCENARIOS

Eric Moreno Quintero
Agustín Bustos Rosales
Luz Angélica Gradilla Hernández
Ricardo Montoya Zamora
Carlos Martner Peyrelongue

**Publicación Técnica No. 482
Sanfandila, Qro, 2016**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Desarrollo de un modelo nacional de transporte
Segunda fase: Actualización de datos y análisis de
escenarios

Publicación Técnica No. 482
Sanfandila, Qro., 2016

Este trabajo se desarrolló en el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) por un equipo de investigadores en el que participaron el Dr. Eric Moreno Quintero y el Dr. Agustín Bustos Rosales, de la Coordinación de Integración del Transporte; la Dra. Luz Angélica Gradilla Hernández, de la Unidad de Sistemas de Información Geoespacial, y el Dr. Ricardo Montoya Zamora, consultor experto en modelos de transporte.

El Dr. Ricardo Montoya propuso los esquemas para estimar las pendientes y curvaturas medias en la red bimodal, así como los procesos de costeo de la operación vehicular en las corridas de asignación, con el apoyo del equipo de investigación para su manejo e implementación práctica en el modelo.

El Dr. Carlos Martner Peyrelongue, coordinador de Integración del Transporte, participó tanto en las discusiones de desarrollo como en el análisis de escenarios, y facilitó la obtención de datos de acceso restringido que fueron de utilidad para el trabajo.

Contenido

Resumen		iii
Abstract		v
Resumen	Ejecutivo	vii
Capítulo 1.	Introducción	1
	1.1 El concepto de modelo nacional	1
	1.2 El modelo revisado	5
Capítulo 2.	Mejoras en la red bimodal	9
	2.1 Atributos para estimar costos operativos	9
	2.2 Integración de datos geométricos a la red bimodal	10
	2.3 Datos de condición superficial en carreteras	18
Capítulo 3.	Estimación de costos operativos	19
	3.1 Estimación de costos en carretera: el modelo HDM-VOC	19
	3.2 Ajustes del modelo para carreteras mexicanas	24
	3.3. Estimación de costos en movimientos ferroviarios	26
Capítulo 4.	Modelación de escenarios	29
	4.1 Estimación de flujos para nuevos proyectos	29
	4.2 Desempeño vehicular en corredores importantes	38
Capítulo 5.	Análisis de resultados	45
	5.1 Los rendimientos de combustible	45
	5.2 Los costos de operación vehicular	47
Capítulo 6.	Conclusiones y trabajo futuro	51
Bibliografía		53

Resumen

Este trabajo es la segunda etapa de desarrollo del Modelo Nacional de Transporte, iniciado por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) en 2015. Aprovechando la experiencia del prototipo construido en la primera etapa, se hicieron varias mejoras y se añadió información para extender las capacidades de análisis del modelo.

Luego de la introducción que resume los antecedentes de la primera etapa del modelo, en el capítulo 1 se comenta el concepto de *modelo nacional* tal como ha aparecido en la literatura en la materia y se aplica en la experiencia de sistemas de transporte en el mundo; ahí también se comentan los detalles del modelo revisado que se utiliza en esta segunda etapa.

En el capítulo 2 se describen las mejoras añadidas a la red bimodal carretera-ferrocarril; se detallan específicamente las estimaciones de pendientes y curvaturas, y se incluyen datos de condición superficial en carreteras, necesarios para estimar los costos de operación vehicular.

En el capítulo 3 se describen los procesos utilizados para estimar los costos de operación vehicular. Éstos se basan en la metodología *Vehicle Operating Costs* (VOC) del Banco Mundial para determinar los costos en carretera y en las estimaciones de los costos ferroviarios, actualizados con el Índice Nacional de Precios Productor del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi) para obtener los costos ferroviarios.

El capítulo 4 muestra la aplicación del modelo nacional mejorado para estimar impactos y el desempeño vehicular en distintos escenarios propuestos, de interés para la planeación del transporte en México.

El capítulo 5 analiza los resultados obtenidos, en particular las estimaciones del desempeño vehicular en los escenarios propuestos en el capítulo 4.

En el capítulo 6 se resume la experiencia del modelo mejorado en las tareas de estimación de impactos en los escenarios considerados, así como las evaluaciones del desempeño vehicular en dichos escenarios, y se plantean líneas de trabajo futuro derivadas de la discusión de los resultados.

Abstract

This work is the second stage of development of the National Transportation Model, started by the Mexican Institute of Transportation (*Instituto Mexicano del Transporte – IMT*), in 2015. On the basis of the previous experiences gained with the prototype built during the first stage, several improvements were made, and new information was added in order to extend the analysis capacities of the model.

Following the introduction section where the background for the first stage of the model is described, Chapter 1 addresses the concept of a national model, as used in current transportation literature and transport systems worldwide. The reviewed model used at this second stage of the model is also commented on Chapter 1.

Chapter 2 describes the improvements added to the bi-modal road-rail network, in particular steep and curvature estimations, as well as roughness data on highways, all of them required to estimate vehicle operating costs.

Chapter 3 explains the processes used to estimate vehicle operating costs, based on the World Bank's Vehicle Operating Costs methodology for road movements, and rail operating costs estimated for Mexican railroads updated based on the National Producer Price Index prepared and published by the National Institute of Statistics and Geography (*Instituto Nacional de Estadística y Geografía – Inegi*).

Chapter 4 shows how the improved National Model of Transportation is used with estimates of impacts and performance of vehicles in several scenarios of interest for transport planning in Mexico.

Chapter 5 analyses the results obtained, particularly vehicle performance estimates under the proposed scenarios in Chapter 4.

Chapter 6 summarizes the experience gained with the improved model for estimating impacts under the scenarios considered, as well as the performance of vehicles. It also describes new study lines for future stages of the project.

Resumen ejecutivo

Este trabajo continúa con el desarrollo de un modelo nacional del transporte de carga en México. En la etapa previa, reportada en la Publicación Técnica núm. 459 del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) en 2015, se construyó la primera versión de una red bimodal que representa las redes carretera federal y ferroviaria nacional, y se realizaron las primeras corridas del modelo de asignación, utilizando los tiempos de recorrido en las redes y un criterio básico de optimización para esos flujos.

En esta etapa se añadió una breve revisión del concepto de *modelo nacional* referido a literatura de transporte reciente, y que es el fundamento teórico del Modelo Nacional de Transporte para México. Un *modelo nacional* es una representación razonable del sistema de transporte *a escala nacional* de un país; en su visión más amplia, éste considera todos los modos de transporte relevantes y puede pronosticar flujos vehiculares con grados diversos de confiabilidad. Los resultados de un modelo confiable del transporte a nivel nacional dan un valioso soporte a la planeación del sistema de transporte de un país, como se ha visto en los modelos nacionales de varios países como Holanda, Noruega, Italia, Irlanda, Uruguay y Brasil.

Mejoras a la red bimodal y nuevos datos

En el modelo nacional trabajado en esta segunda etapa, se mejoró la representación de la red bimodal carretera-ferrocarril, utilizando la referencia de la Red Nacional de Caminos (RNC) para la parte carretera y actualizando la red ferroviaria original con información reciente obtenida de la Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal (DGTFM) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) de México.

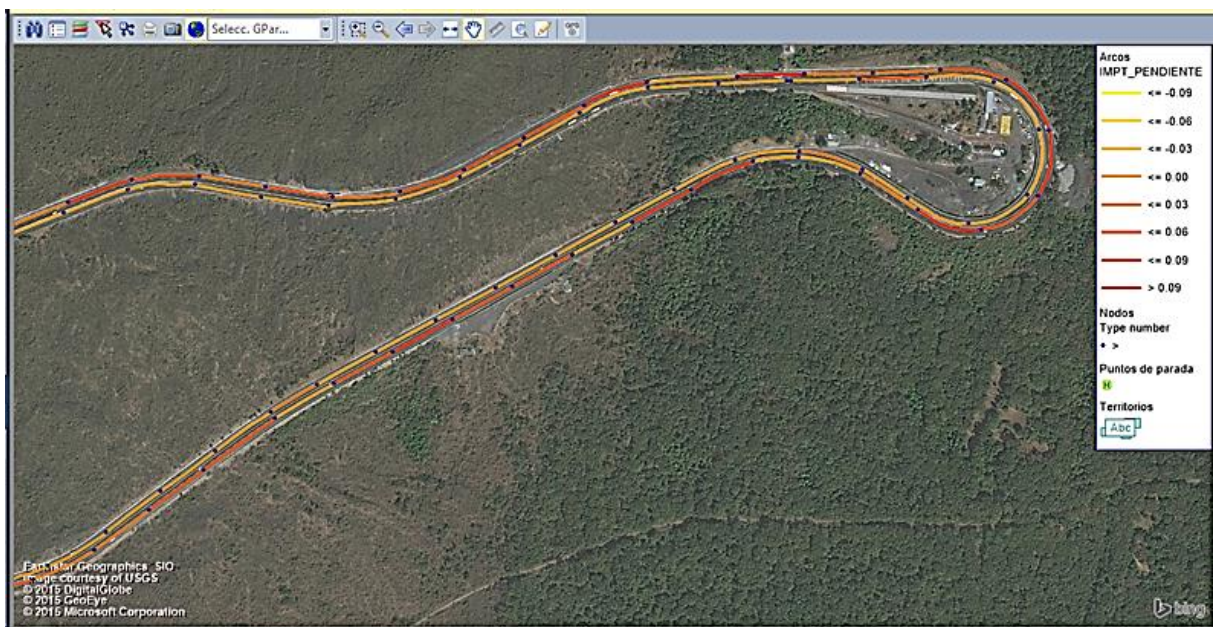
Las versiones utilizadas de estas dos redes integradas en una sola red bimodal, sin embargo, no contienen información sobre pendientes y curvaturas medias en sus tramos, para lo cual se elaboraron rutinas de estimación de estos parámetros, necesarios para calcular los costos de operación vehicular.

Con base en el *Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0* del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi), que contiene datos georreferenciados de elevaciones del territorio nacional, se efectuaron estimaciones de las pendientes medias en los tramos de la red bimodal, y considerando las coordenadas geográficas de los puntos de inicio y fin de los tramos de interés, se calculó la pendiente media como sigue.

$$Pendiente\ media = \frac{(Elevación\ punto\ inicio) - (Elevación\ punto\ final)}{Longitud\ del\ arco}$$

La figura que sigue muestra valores medios de pendiente en la carretera México-Cuernavaca, sobre la curva conocida como “La Pera”, luego de realizarse las estimaciones correspondientes. Los rangos de pendientes aparecen con un código de color.

Pendientes medias: carretera México-Cuernavaca

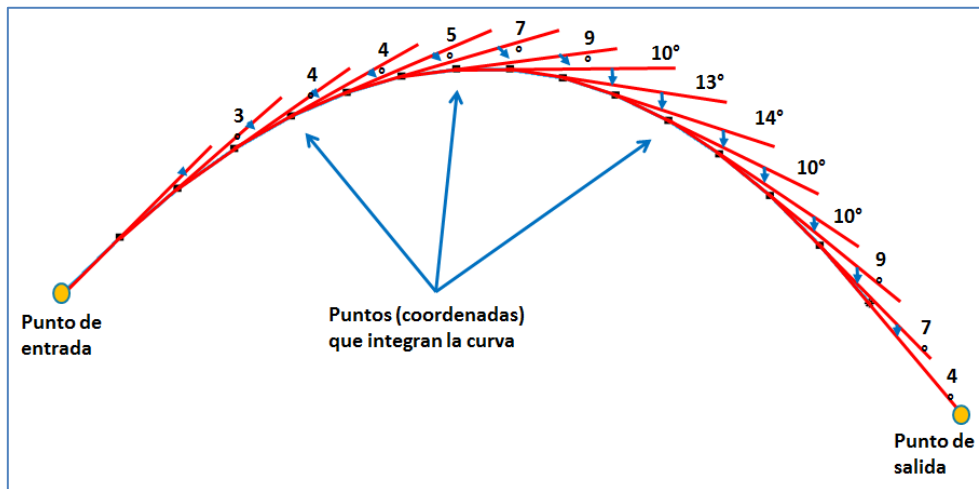


Fuente: elaboración propia.

Para el cálculo de curvaturas en tramos de la red, se utilizó un esquema de variaciones angulares a lo largo de las curvas para determinar la desviación total en grados sexagesimales entre el punto de entrada a la curva y el correspondiente punto de salida.

La figura siguiente muestra un ejemplo de este esquema de cálculo, donde se acumula un total de 109° a lo largo de la curva.

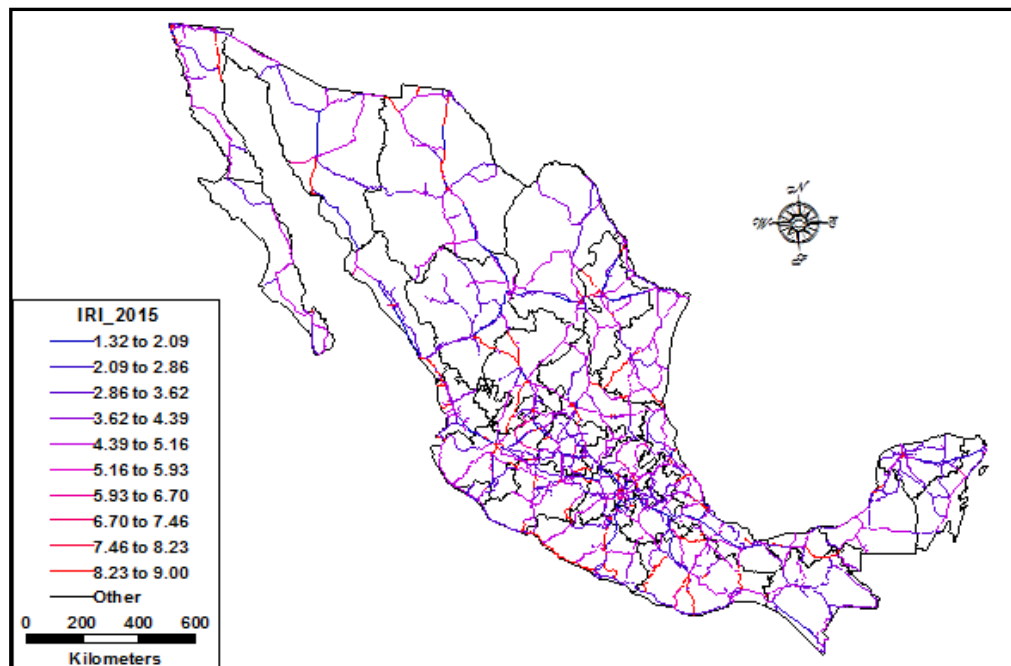
Variación angular a lo largo de la curva



Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente a la integración de datos de pendiente y curvatura media en toda la red bimodal, para la parte carretera se añadió también información reciente del Índice Internacional de Rugosidad (IIR), el cual, además de medir la condición de la superficie de rodadura, es otro elemento importante en la estimación del costo de operación vehicular. La información del IIR se obtuvo con apoyo de la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la SCT. El mapa siguiente muestra la red carretera federal con datos del IIR del año 2010.

Valores de IIR-2010 en la Red Carretera Federal



Fuente: DGST-SCT.

Costos de operación vehicular

Una vez integrados al modelo los datos de pendientes y curvaturas medias en toda la red, más los datos de rugosidad en la parte carretera, se abordó la cuestión relativa al cálculo de los costos de operación vehicular (COV).

Para los flujos carreteros, se utilizó la metodología del Banco Mundial, disponible en el módulo de costos del sistema Highway Development and Management (HDM-VOC), adaptado para su uso en México en la versión VOC-MEX — desarrollada en el IMT y actualizada en las publicaciones de los costos de operación base recientes— (Arroyo *et al.*, 2016).

Las características del camino que el HDM-VOC toma en cuenta son las siguientes:

- a) tipo de superficie (pavimentada / no pavimentada)
- b) índice de rugosidad
- c) perfil vertical (proporciones de pendientes positivas y negativas)
- d) perfil horizontal (curvaturas y sobreelevaciones promedio)
- e) altitud promedio
- f) número de carriles

Para cada tipo vehicular, el HDM-VOC calcula los costos operativos con los cuatro pasos siguientes (Archondo y Faiz, 1994):

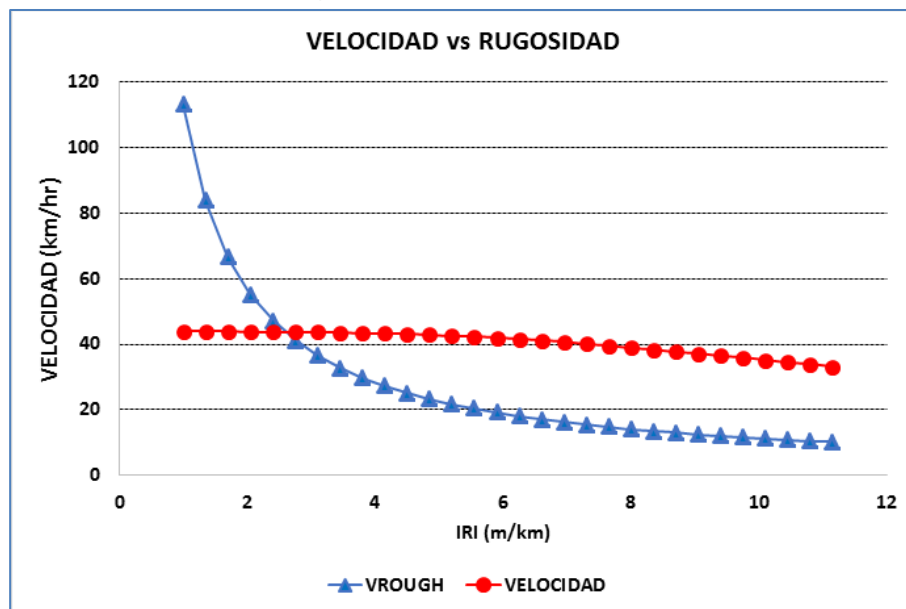
1. Se calcula la velocidad media de operación.
2. Se calculan cantidades de recursos usados por cada 1,000 veh-km de:
 - a. consumo de combustible
 - b. consumo de lubricantes
 - c. desgaste de llantas
 - d. tiempo de operador
 - e. tiempo de pasajeros (si hay)
 - f. tiempo de retención de la carga
 - g. mano de obra de mantenimiento
 - h. refacciones
 - i. depreciación
 - j. intereses
 - k. gastos generales
3. Se aplican costos unitarios al consumo de recursos y se obtiene el costo operativo por cada 1,000 veh-km para cada elemento de costo.

4. Se suman los costos operativos de cada elemento de costo y así se integra el costo total de operación vehicular por cada 1,000 veh-km.

La velocidad pronosticada (V) del vehículo se estima considerando las características generales de la geometría del camino y la condición de la superficie de rodamiento, para generar un valor representativo de la velocidad del vehículo.

Un ejemplo de cómo varía la velocidad según el IIR de la superficie de rodamiento se ilustra en la figura siguiente. Allí puede observarse la velocidad resultante en un camión articulado T3S2 conforme aumenta el IIR; también se muestra la variación del parámetro VROUGH usado en el cálculo de costos de operación (éste corresponde a la velocidad límite considerando sólo la rugosidad del camino). Puede verse cómo esta velocidad decrece en forma constante a medida que aumenta el valor del IIR.

Relación velocidad vs rugosidad del camino. Camión articulado T3S2



Fuente: elaboración propia.

Entre los datos de referencia utilizados, se incluyen los consumos de combustible típicos de camiones de carga en México, que se compararon con los pronosticados por el HDM-VOC. El HDM-VOC calcula el consumo de combustible como el número de litros consumidos por cada 1,000 veh-km, denotado FL, y el costo unitario del combustible mediante la relación:

$$\text{Costo por 1,000 veh-km} = \text{FL} \times \text{costo unitario por litro}$$

Para las carreteras mexicanas, se obtuvo una muestra de rendimientos de las principales configuraciones vehiculares que mueven carga: C2, C3, T3S2, T3S3 y T3S2R4, declarados por transportistas que prueban sus esquemas de costos en el Sistema de Costos en el Autotransporte de Mercancías (SICAM) que el IMT ofrece

con acceso libre en su página web. Los valores promedio de rendimiento obtenidos se muestran enseguida.

Rendimientos típicos de camiones de carga en México

Rendimientos promedio (km/l)		
Tipo vehicular	Cargado	Vacío
C2	3.629	4.322
C3	3.271	3.760
T3S2	2.872	3.548
T3S3	2.001	3.142
T3S2R4	1.662	2.726

Fuente: elaboración propia con datos del SICAM-IMT.

Con base en esta muestra de rendimientos, las ecuaciones de consumo de combustible del HDM-VOC se ajustaron, y se obtuvieron valores de consumo congruentes con los resultados del cálculo de costos.

Para la operación ferroviaria, se utilizó la referencia de Centeno y Mendoza (2003) basada en la “Metodología para el Cálculo de Costos de Operación Ferroviaria”, desarrollada por la extinta paraestatal Ferrocarriles Nacionales de México, la cual considera los siguientes aspectos:

- amortización de las locomotoras;
- amortización de los carros;
- salarios de la tripulación;
- costo de combustibles y lubricantes;
- costos de mantenimiento de vía y equipo, y
- otros costos secundarios (reparaciones, salarios de operadores, etc.).

Sobre esta base, y con los costos medios de operación ferroviaria para 2002 (Centeno y Mendoza, 2003), se estimaron costos para los tres tipos de terreno: plano, lomerío y montañoso.

Estos costos se actualizaron llevando seguimiento al Índice Nacional de Precios Productor (INPP) del Inegi. La figura siguiente muestra la inflación basada en el INPP en el período 2002-2014.

Calculadora de inflación [Ayuda](#)

La calculadora de inflación le permite conocer cual ha sido la inflación en el período que usted defina. Lo único que debe hacer es indicar el período y oprimir el botón de calcular.

Cálculo de inflación

Índice nacional de precios productor. Base junio 2012=100 (SCIAN 2007)
Producción total según actividad económica (finales más intermedios clasificación SCIAN 2007) > Actividades terciarias > 48-49 Transportes > correos y almacenamiento > 482 Transporte por ferrocarril > 4821 Transporte por ferrocarril
 Período: Ene 1981 - Feb 2015 Índice base junio 2012 = 100

Inflación en un período determinado

Seleccione el período de interés y oprima el botón de calcular.

DE
A

Dic ▼ / 2002 ▼
Dic ▼ / 2014 ▼

Inflación de Dic 2002 a Dic 2014: 215.81%

Tasa Promedio Mensual de Inflación de Dic 2002 a Dic 2014: 0.80%

Calcular
Cerrar

Fuente: elaboración propia.

Modelación de escenarios

Con el modelo ajustado se realizaron ensayos de escenarios.

El primer ensayo fue de flujos potenciales de carga en tramos por construir.

El segundo ensayo fue un análisis comparativo de flujos esperados en corredores importantes a los que se hicieron mejoras. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tramo corto Aguascalientes-Guadalajara

El tramo, con una longitud estimada de 188 km, es el resultado de una mejora de la red ferroviaria nacional prevista en el Plan Nacional de Infraestructura (PNI). Anunciado para el horizonte 2015-2017, éste busca mejorar la eficiencia de los corredores Manzanillo-Tampico y Manzanillo-Nuevo Laredo (Quintana, M., 2014a).

Aunque el trazo del proyecto no se hizo público, con base en datos de elevaciones del territorio nacional del Inegi, se agregó un tramo representativo en la red bimodal para modelar el proyecto, como se ilustra en la figura siguiente, con la línea punteada que va de Guadalajara a Aguascalientes.

Asignación de flujo potencial: tramo corto Guadalajara-Aguascalientes



Fuente: elaboración propia.

La longitud del tramo representativo resultó de 209 km. Con el modelo de asignación se obtuvo un flujo estimado de aproximadamente 5.8 millones de toneladas anuales, que equivale a un 60.4% de la demanda esperada de 9.6 millones de toneladas considerada en el anuncio público del proyecto.

Rutas de Zonas Económicas Especiales en Michoacán

En 2016, el gobierno del estado de Michoacán se interesó en desarrollar un eje carretero que conectara a la Ciudad de México (CDMX) con el Puerto de Lázaro Cárdenas. Este proyecto se ubica en las Zonas Económicas Especiales (ZEE) de Michoacán.

La propuesta del gobierno de Michoacán planteó dos rutas con tramos nuevos. La primera con un nuevo tramo desde Huetamo a Las Cañas y luego hacia Lázaro Cárdenas; la otra con otro nuevo tramo desde Huetamo a Infiernillo para luego ir a Lázaro Cárdenas. Estas rutas se compararon con dos rutas actuales en uso.

La tabla enseguida resume los resultados de estas comparaciones. Los escenarios 1 y 2 corresponden a las rutas actuales en uso, y los escenarios 3 y 4 a las rutas propuestas.

Desempeño vehicular: escenarios ZEE de Michoacán, por tiempo, velocidad y consumo de combustible

	Distancia (km)	Tiempo de recorrido (hh:mm) por tipo de vehículo						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Escenario 1	616.31	7:50	9:11	10:18	10:49	10:38	11:16	12:29
Escenario 2	689.6	8:26	9:47	11:02	11:31	11:13	11:49	13:04
Escenario 3	553.7	7:29	8:55	9:54	10:28	10:27	11:04	12:16
Escenario 4	514.45	6:58	8:19	9:15	9:49	9:49	10:25	11:34

	Distancia (km)	Velocidad promedio (km/h) por tipo de vehículo						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Escenario 1	616.31	78.7	67.1	59.8	57.0	57.9	54.7	49.3
Escenario 2	689.6	81.8	70.5	62.5	59.9	61.5	58.3	52.8
Escenario 3	553.7	74.0	62.1	55.9	53.0	53.0	50.0	45.2
Escenario 4	514.45	73.8	61.8	55.6	52.6	52.4	49.4	44.5

	Distancia (km)	Consumo de combustible (litros) por tipo de vehículo						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Escenario 1	616.31	45.2	202.0	145.6	236.5	289.3	378.3	564.0
Escenario 2	689.6	48.1	205.0	148.6	238.5	292.7	380.9	564.3
Escenario 3	553.7	42.1	193.4	139.2	227.7	278.2	364.6	545.2
Escenario 4	514.45	39.2	180.5	129.8	212.4	259.7	340.4	508.8

Fuente: elaboración propia.

Si bien en orden de mérito por los desempeños vehiculares y la distancia recorrida el escenario 3 es el mejor, en la estimación de los flujos asociados, con información OD de la matriz ajustada a 2014, se obtuvieron bajos niveles de flujo.

Las figuras siguientes muestran el resultado de la asignación de flujos en las rutas propuestas por el gobierno de Michoacán.

Flujos escenario 3, tramo Las Cañas-Huetamo



Fuente: elaboración propia.

Flujos escenario 4, tramo Infiernillo-Huetamo



Fuente: elaboración propia.

De las dos figuras mostradas se puede ver que el nivel de tráfico para el tramo Huetamo-Las Cañas es bastante menor que el caso del tramo Huetamo-Infiernillo. Ambos casos son, sin embargo, de valores moderados a bajos, de no más de

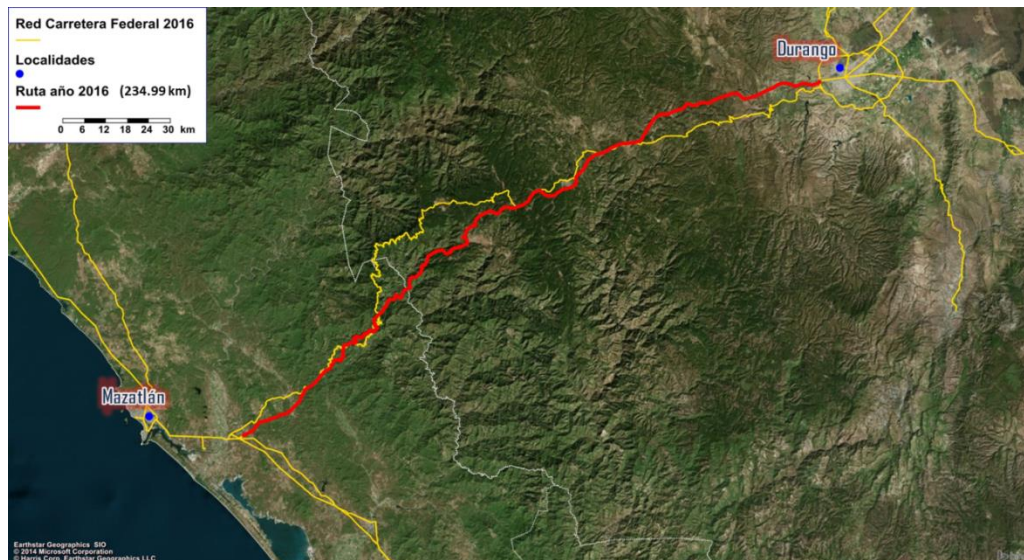
2,334 vehículos al día, lo que sugiere que en el mejor de los casos no habría un impacto favorable en el tráfico.

Autopista Durango-Mazatlán

La autopista Durango-Mazatlán está considerada como la más complicada construida en México, con 230 km, 115 puentes y 61 túneles en total. El beneficio estimado en tiempo de recorrido para los automóviles es una reducción de seis a dos horas y media, y para los camiones de carga de doce a seis horas (T21, 2012).

Para el modelado de esta autopista se tomaron los trazos de 2006 (antes de la construcción) y 2016 (con la nueva autopista), con la correspondiente información origen-destino. La figura siguiente muestra los trazos: en amarillo la vieja ruta y en rojo la nueva autopista.

Ruta Durango-Mazatlán en 2016: 234.99 km



Fuente: elaboración propia.

Con la metodología de costos de operación vehicular (COV) se obtuvieron las tablas siguientes que muestran el desempeño vehicular por clases en la comparación de la vieja ruta y la nueva autopista ya terminada.

Los resultados obtenidos muestran una notable mejoría del desempeño de los vehículos con la nueva autopista, y son consistentes con los beneficios anunciados.

Desempeño vehicular: ruta Durango-Mazatlán (antes y después de la nueva carretera)

Año	Distancia (km)	Tiempo de recorrido (hh:mm) por tipo de vehículo						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2006	308.26	5:18	6:12	6:30	6:42	8:48	9:00	11:42
2016	234.99	3:06	3:42	4:06	4:18	4:06	4:18	4:48

Año	Distancia (km)	Velocidad promedio por tipo de vehículo (km/h)						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2006	308.26	58.33	49.33	47.52	45.72	35.21	34.19	26.46
2016	234.99	76.21	63.84	57.85	54.95	57.64	54.41	49.15

Año	Distancia (km)	Consumo de combustible (litros) por tipo de vehículo						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2006	308.26	54.02	179.09	172.86	286.67	285.48	373.99	547.59
2016	234.99	25.54	120.53	87.19	144.32	175.05	230.91	349.20

Fuente: elaboración propia.

Autopista México-Tuxpan

Esta autopista de cuatro carriles incluye seis túneles y diez puentes, entre los cuales figura el puente Gilberto Borja Navarrete, considerado el segundo puente más alto del mundo, sobre el río San Marcos (Excélsior, 2014). La reducción de tiempo estimada para un automóvil fue de seis horas a sólo 2:45 h (Excélsior, 2014). La figura siguiente muestra el trazo modernizado de la ruta en 2016.

Ruta México-Tuxpan en 2016: 292.92 km



Fuente: elaboración propia.

Otros beneficios estimados son el impulso al parque industrial en Tulancingo, Hidalgo, y a la Terminal Intermodal Logística de Hidalgo (Zanela, L. A., 2014).

La tabla siguiente muestra la comparación del desempeño vehicular antes y después de la modernización.

Desempeño vehicular. Ruta México-Tuxpan, antes y después de la nueva carretera

Año	Distancia (km)	Tiempo de recorrido (hh:mm) por tipo de vehículo						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2006	327.64	5:20	6:12	6:28	6:38	8:52	9:02	11:43
2016	292.92	3:41	4:16	4:48	4:59	4:58	5:12	5:41

Año	Distancia (km)	Velocidad promedio por tipo de vehículo (km/h)						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2006	327.64	61.38	52.78	50.65	49.39	36.92	36.24	27.95
2016	292.92	79.70	68.61	61.11	58.82	59.00	56.38	51.58

Año	Distancia (km)	Consumo de combustible (litros) por tipo de vehículo						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2006	327.64	50.67	148.85	145.47	235.54	237.36	307.63	444.19
2016	292.92	29.40	127.11	92.15	149.99	182.01	238.69	358.16

Fuente: elaboración propia.

Las estimaciones del desempeño vehicular de la tabla 4.4 muestran claramente una mejora notable en los tiempos de recorrido, velocidades y consumos de combustible con la nueva autopista México-Tuxpan.

Estimaciones de rendimiento

Uno de los resultados estimados en la comparación de escenarios fue el consumo de combustible (litros) para los tipos vehiculares considerados. Con este dato y la estimación de la distancia recorrida (km) en cada escenario comparado, se obtiene la correspondiente estimación del rendimiento de combustible expresado en kilómetros por litro.

En las tablas mostradas a continuación se presentan estos rendimientos para los escenarios de autopistas modelados.

Rendimiento de combustible comparado (antes y después), ruta Durango-Mazatlán

Año	Distancia (km)	Rendimiento de combustible (km/l) por tipo de vehículo						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2006	308.26	5.71	1.72	1.78	1.08	1.08	0.82	0.56
2016	234.99	9.20	1.95	2.70	1.63	1.34	1.02	0.67
	Increment%	61.2%	13.3%	51.1%	51.4%	24.3%	23.5%	19.5%

Fuente: elaboración propia.

Rendimiento de combustible comparado (antes y después), ruta México-Tuxpan

Año	Distancia (km)	Rendimiento de combustible (km/l) por tipo de vehículo						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2006	327.64	6.47	2.20	2.25	1.39	1.38	1.07	0.74
2016	292.92	9.96	2.30	3.18	1.95	1.61	1.23	0.82
	Increment%	54.1%	4.7%	41.1%	40.4%	16.6%	15.2%	10.9%

Fuente: elaboración propia.

Los rendimientos de combustible son, sin duda, un elemento adicional para considerar en la evaluación de beneficios de los proyectos modelados. Estos beneficios no solamente pueden ser un elemento de discusión en el tema de peajes en estas rutas mejoradas, sino también un dato de interés para la evaluación de impactos ambientales en cuanto a emisiones contaminantes.

Finalmente, para las líneas futuras de desarrollo del proyecto del modelo nacional de transporte, se ha considerado integrar el parámetro *valor del tiempo* para el movimiento de carga, un elemento importante para aplicar un costo generalizado que modele adecuadamente los efectos de la congestión.

En otra extensión natural del modelo nacional se buscará incluir en la matriz origen-destino la totalidad de vehículos circulantes, incluidos automóviles y autobuses. De este modo, se podrán hacer estimaciones de niveles de servicio asociados a la congestión carretera.

Adicionalmente, se buscará realizar una estimación de los impactos ambientales derivados de los flujos vehiculares estimados, a fin de estudiar acciones de mitigación de estos impactos.

1 Introducción

La relevancia del transporte terrestre de carga en México aparece en varios aspectos de la vida nacional: en la economía como un elemento necesario para mover productos diversos; en el sistema de transporte nacional como un usuario importante que utiliza infraestructura, combustibles y vehículos, y en el medio ambiente como un actor notable en la emisión de contaminantes y ruido.

En este contexto, la modelación del sistema de transporte terrestre de carga resulta una estrategia adecuada para su planeación: para evaluar políticas del sector transporte alineadas con los objetivos nacionales en materia de sostenibilidad, y para diseñar medidas de control y mitigación de los impactos negativos del transporte de carga, sin menoscabo de sus beneficios económicos y sociales.

Un modelo que represente razonablemente el sistema carretero junto al sistema ferroviario en el movimiento de la carga en el país constituye una herramienta muy útil para estimar el comportamiento de los flujos de carga en escenarios diversos, como son: nuevos movimientos de carga en puntos específicos de la red; reacomodo de flujos de carga por la construcción de tramos nuevos en la red, o nueva reglamentación del sector que induzca cambios en el reparto modal.

Este trabajo es la segunda etapa del proyecto de construcción de un modelo del sistema de transporte terrestre de carga para México. La primera etapa, reportada en la Publicación técnica núm. 459 realizada por el IMT en 2015, sirvió de marco para definir las bases de construcción del modelo, la primera red bimodal carretera-ferrocarril y algunas matrices origen-destino iniciales. La experiencia de esa etapa permitió, asimismo, identificar mejoras del modelo y posibilidades de extenderlo para incluir aspectos no considerados en la primera etapa, como es el cálculo de los costos de operación vehicular y la migración del ambiente del software TransCAD hacia el software Visum.

En las secciones siguientes se discuten las mejoras más relevantes planteadas para este modelo, lo que incluye lo relativo a la información que permitirá refinar los resultados y detallar más las representaciones de la red bimodal.

1.1 El concepto de modelo nacional

La idea de un modelo nacional de transporte como un proyecto que permitiera pronosticar el tráfico vehicular a escala nacional surgió en algunos países europeos alrededor del inicio de la década de 1980.

En su concepción más amplia, se esperaba que un modelo nacional cubriera todos los modos de transporte (carga y pasaje) relevantes para el país en que se

aplicara; así, por ejemplo, para Noruega era muy importante el transporte aéreo, pero no resultaba igual de relevante para los movimientos interiores en Holanda. Los modelos nacionales generalmente fueron emprendidos por agencias nacionales de planeación o ministerios del transporte, aunque en la práctica podían ser operados por otras agencias o consultores especializados.

Desde los primeros intentos de modelación, resultó evidente que la gran cantidad de recursos necesarios en cuanto a datos, personal calificado y capacidad computacional para tener un buen modelo de transporte a escala nacional, quedarían finalmente compensados por las capacidades del modelo para evaluar cambios en el sistema de transporte, como podrían ser modificaciones a la infraestructura, aumentos de precio de combustibles o exigencias ambientales, además de que podría utilizarse para evaluar políticas de transporte y pronosticar los tráficos esperados y sus correspondientes impactos en cuanto a congestión, emisiones contaminantes o seguridad vial (Daly, 2000).

El primer modelo conocido de este tipo fue el Regional Highways Traffic Model (RHTM), desarrollado en Inglaterra en 1978, para pronosticar el tránsito carretero de automóviles. Aunque las experiencias de este desarrollo sirvieron para guiar el desarrollo de este tipo de proyectos en otros países, el RHTM no llegó a cumplir sus objetivos iniciales y resultó demasiado costoso, por lo que a la larga fue abandonado.

En los Países Bajos se desarrolló el llamado Netherlands National Model (NMM), iniciado en 1983 y completado en su primera versión en 1985; a la fecha sigue en uso. El planteamiento original fue pronosticar el tráfico en la red principal de carreteras y ferrocarriles, lo que implicó la modelación del reparto modal como una parte esencial. Todas las mejoras añadidas a este modelo lo han convertido en un caso exitoso, principalmente por la capacidad que ha tenido de generar pronósticos verosímiles para un amplio rango de políticas de transporte que se han evaluado.

El modelo nacional noruego, inspirado en la experiencia holandesa del NMM, desarrolló su primera versión entre 1988 y 1990 con el objetivo de apoyar un estudio nacional de contaminación atmosférica sin ser específico para un área geográfica en particular. El modelo se actualizó con los desarrollos posteriores de entre 1992 y 1994 para poder pronosticar tráfico en tramos específicos de la red de transporte. Un rasgo muy especial del modelo nacional noruego es que su desarrollo inicial arrancó con un presupuesto bastante modesto; las decisiones de inversión de los desarrollos posteriores fueron tratadas como extensiones de un sistema ya en operación, de modo que nunca se enfrentó el problema de conseguir un enorme presupuesto para el desarrollo del modelo.

El modelo nacional italiano fue el que tuvo la mayor escala en representación geográfica y también se basó en la experiencia holandesa, iniciando su primera etapa en 1993. Este modelo ya consideró un ambiente computacional más amplio, desarrollando una sofisticada interfaz para el usuario basada en el sistema

operativo Windows NT para dar acceso al sistema y a sus bases de datos a un amplio grupo de usuarios. Este modelo ya trata de manera integrada los movimientos de carga y pasaje conjuntamente en el desarrollo (Daly, 2000).

El modelo nacional de Irlanda, National Transport Model (NTpM), comenzó a desarrollarse en 2011 por la National Roads Authority (NRA) como una mejora del llamado National Traffic Model de 2008, y su más reciente actualización fue al año base 2013. La entidad responsable de su mantenimiento y aplicaciones es la Strategic Planning Unit de la NRA y puede ser usado por las agencias gubernamentales, las autoridades locales y para propósitos de investigación (NRA, 2013). Este modelo se ha descrito como una herramienta para pronosticar las demandas de viajes y sus patrones en todo el territorio de Irlanda, considerando los modos carretero y ferroviario, y enfocado al tráfico interurbano y a los viajes en la red estratégica (Shiels, 2014).

En los Estados Unidos, aunque no se ha construido un modelo nacional como en los países europeos, en 1991 se inició el desarrollo del Marco de Análisis de la Carga (*Freight Analysis Framework*, FAF) por una iniciativa conjunta de la Oficina de Estadística de Transportes (*Bureau of Transportation Statistics*, BTS) y la Administración Federal de Carreteras (*Federal Highway Administration*, FHWA).

El FAF consolida datos de diversas fuentes para generar una visión muy amplia de los movimientos de carga entre los estados y las principales áreas metropolitanas estadounidenses considerando todos los modos de transporte, con base en datos de la Encuesta de Flujos de Mercancías (*Commodity Flow Survey*, CFS) y datos de comercio internacional aportados por la Oficina del Censo (*Census Bureau*). Además, el FAF incorpora datos del sector agrícola, de las industrias extractivas, la construcción, los servicios y otros sectores. La versión cuatro del FAF (FAF4) — la más reciente edición de la CFS— ofrece estimaciones de tonelajes y valores de carga movida por regiones de orígenes y destinos, tipo de carga y modo de transporte para el año 2012, (FAF, 2016).

En Uruguay, el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) presentó en 2015 el *Estudio de Demanda y Modelo de Asignación Modal de Transporte Interurbano de Carga en Uruguay*, desarrollado con apoyo de CSI Ingenieros de Uruguay y Steer Davis Gleave de Chile. El estudio inició en septiembre de 2014 con el objetivo central de permitir al MTO: “[...] *disponer de la información y las herramientas esenciales para estructurar una metodología de priorización de las inversiones en la red de transporte nacional, con objeto de optimizar el uso de los recursos disponibles del sector*” (MTO, 2016).

El logro de este objetivo implicaba desarrollar la capacidad de:

- Representar los principales flujos de carga que usan la infraestructura del país, identificando los productos y los orígenes-destinos más relevantes.
- Cuantificar la demanda de transporte y de servicios logísticos.

- Diagnosticar la oferta de infraestructura y servicios de transporte actuales, en función de su demanda.
- Delinear un modelo de simulación de los flujos estratégicos en la infraestructura nacional, abierto y flexible, y que admita actualizaciones respecto a cambios en la oferta o demanda de infraestructura y permita estimar impactos sobre la infraestructura en el corto y mediano plazos (MTOPI, 2016).

En Brasil, el gobierno federal, junto con la Empresa de Planeamiento e Logística, S.A., presentó en 2015 el Plan Nacional de Logística Integrada (PNLI).

El objetivo principal de este proyecto es “[...] *desarrollar la planificación estratégica para optimizar el movimiento de carga con diferentes medios de transporte que utilizan los ferrocarriles, el transporte marítimo de cabotaje y el de vías navegables interiores como sistemas de alta capacidad, y la red integrada regional de carreteras de forma sinérgica y armónica*” (EPL, 2016).

De los primeros resultados de 2015, se obtuvieron:

- El reparto modal para 2015.
- El reparto modal, por modo de transporte y por tipo de producto en 2015.
- La división de cargas por grupo de productos para 2015.
- La participación porcentual en las emisiones de CO₂ por modo de transporte en 2015.

En México no se dispone aún de un modelo nacional propiamente dicho, con una visión integral de todos los modos de transporte; sin embargo, se han realizado estudios enfocados en la modelación de la red de transporte terrestre, considerando el modo carretero y el ferroviario principalmente. En 1999, Gil, Reyes y Mendoza realizaron el estudio *Modelación multiproducto de los flujos de carga en las redes carretera y ferroviaria* (Gil, C.; Reyes, R. y Mendoza, A., 1999), detallado en la Publicación técnica núm. 126 del IMT. Este trabajo fue el primer intento por abordar el reparto modal del transporte terrestre de carga utilizando un modelo de redes, con cálculos de las asignaciones de flujos con un criterio de optimizar el costo total de las operaciones en la red.

Para la modelación en cuestión, se utilizó el software STAN (del inglés: *Strategic Transportation Analysis*) de la empresa canadiense INRO, y se consideró el flujo de varios productos, clasificados en diez grupos genéricos. Los movimientos ferroviarios se obtuvieron de la empresa Ferronales que controlaba la industria ferroviaria entonces, y los movimientos carreteros de la Dirección General de Autotransporte Federal (DGAF).

En el modelo se consideraban tres modos: flujos en carreteras libres de peaje, flujos en carreteras de cuota y flujos ferroviarios. La transferencia entre modos consideró 70 puntos representando estaciones ferroviarias importantes o terminales intermodales activas.

Con base en datos de 1994, el modelo construido permitió pronosticar un reparto de la carga terrestre de 90% para la carretera y de 10% para el ferrocarril. El estudio incluye recomendaciones para aumentar la participación del ferrocarril en el movimiento de carga terrestre y la conveniencia de usar la metodología del estudio para estimaciones futuras.

Una segunda versión de este trabajo, enfocada en los flujos transfronterizos México-EUA, se realizó en el año 2000 por Mendoza, Gil y Trejo (Mendoza, A.; Gil, C. y Trejo, J., 2000) descrito en la Publicación técnica núm. 137 del IMT. Con la misma metodología del estudio de 1999, el ejercicio de asignación de flujos pronosticó un reparto modal para los flujos entrantes (EUA a México) de 70.2% para el autotransporte y 29.8% para el ferrocarril, mientras que para los flujos hacia el norte (México a EUA) el pronóstico fue de 84.2% y 15.8%, respectivamente.

A principios de 2014, en un marco de colaboración tecnológica del IMT con la empresa alemana PTV (Planung Transport Verkehr AG), desarrolladora del software de planeación de transporte *Visum*, se plantearon las bases para desarrollar un modelo base de transporte y logística para carga. En 2015, se desarrolló en el IMT el proyecto MI-01/15, *Hacia el desarrollo de un modelo nacional de transporte: primera fase: Construcción de la red intermodal y primeros análisis*, cuyos resultados se detallan en la Publicación técnica núm. 459 del IMT, antecedente directo del presente trabajo.

1.2 Modelo revisado

Este trabajo es la segunda etapa en la construcción de un modelo nacional de carga para México que pueda emplearse confiablemente para fines de planeación del sistema de transporte nacional.

Entre las tareas de planeación que se pueden apoyar con los resultados de la modelación se incluyen:

- a) El análisis sistemático de los atributos de la infraestructura, de la operación de las redes de transporte y de sus nodos logísticos.
- b) La evaluación de escenarios para mejorar la sostenibilidad del sistema nacional de transporte, en sus dimensiones ambiental, económica y social.
- c) La modelación de escenarios alternativos de reparto modal de carga entre carretera y ferrocarril en las redes, considerando costo operativo, tiempo de traslado o externalidades socio-ambientales.

- d) Con base en los resultados de la modelación, estimar el desempeño de los planes propuestos para el transporte y la infraestructura, así como de las políticas relevantes para el sector.

Del desarrollo de la etapa previa, con la experiencia adquirida y el análisis de los primeros resultados, se puede lograr hacer una descripción básica de cómo está conformado este modelo nacional de transporte de carga.

En su sentido habitual, un *modelo* es una representación de la realidad que nos interesa; en este caso, el transporte terrestre de carga en México, que es parte crucial de todo el sistema de transporte nacional.

Los principales elementos que en esta etapa integran este modelo son:

- 1) Un conjunto de supuestos lógicos y operativos de los modos de transporte.**

Aquí se han incluido consideraciones específicas sobre la forma de operar en carretera y en ferrocarril que provienen de la experiencia práctica y de las opiniones de especialistas en transporte. Por ejemplo, que los traslados de carga ferroviaria no ocurren en general para distancias menores a 400 km; que muchos productos perecederos se mueven por carretera, más que en ferrocarril; que las condiciones de las carreteras tales como diseño geométrico e índice de rugosidad impactan los costos operativos del autotransporte, etc.

- 2) Una red que representa las carreteras y las líneas de ferrocarril.**

La red utilizada en el modelo es una red bimodal que incluye la red carretera federal y la red ferroviaria. La información carretera proviene de la Red Nacional de Caminos, creada conjuntamente entre el Inegi, la SCT y el IMT, de uso obligatorio como fuente oficial de caminos en México. La información ferroviaria se originó en un trabajo conjunto de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la SCT, y se ha mejorado su representación por una colaboración del IMT con el Inegi y la Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal (DGTFM) de la SCT. Ambas redes están georreferenciadas y tienen capas de datos básicos como velocidades de diseño, tiempos de recorrido, número de carriles, jurisdicción, etc. Esta red bimodal contiene 43 nodos que representan terminales intermodales o estaciones de ferrocarril donde hay transferencia entre autotransporte y ferrocarril.

- 3) Un conjunto de datos origen--destino de los movimientos en la red.**

La información origen-destino se utiliza para integrar el modelo de asignación de flujos. Para los movimientos carreteros, se dispone de una matriz generada en trabajos previos de modelación de reparto modal carretera-ferrocarril, que se ha ajustado con procedimientos adecuados de modo que los flujos pronosticados resulten consistentes con la información

de datos viales que genera la SCT. Para los movimientos ferroviarios, se dispone de información origen-destino que comparte la Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal (DGTFM) con el IMT para realizar estudios estadísticos y que se genera por las propias empresas ferroviarias bajo un convenio de confidencialidad.

4) Un modelo matemático del comportamiento de los flujos.

Este modelo pronostica las rutas usadas en la red bimodal y estima los volúmenes circulantes resultantes bajo un criterio de optimización. Para los flujos en carretera, considerando que los usuarios eligen libremente sus rutas y eventualmente aparece la congestión, el modelo de asignación de flujos utiliza el esquema de equilibrio del usuario, calculando los efectos de congestión con una función de volumen-demora adecuada. Para los flujos ferroviarios, dada la operación controlada en ese modo, el modelo de asignación pronostica las rutas como las más cortas dentro de la red ferroviaria; este esquema se conoce como criterio de asignación “todo o nada”.

5) Una representación computacional del modelo.

El modelo descrito se implementa en una representación computacional utilizando software de planeación del transporte especializado. El uso de este tipo de software surge de modo natural, ya que se maneja una gran cantidad de información para la red bimodal y para las matrices OD, además de que el proceso de ajuste de la matriz OD carretera y el algoritmo para encontrar los flujos de equilibrio requieren un nivel intensivo de cómputo. En el presente trabajo se utiliza fundamentalmente el software Visum de la empresa PTV, que es de amplio uso y aceptación en el ambiente de modelación del transporte. Algunos de los procedimientos que se realizaron en la etapa previa de este proyecto utilizando el software TransCAD, se han adaptado también para su implementación en Visum.

En la conceptualización del modelo de transporte terrestre de carga desarrollado en este trabajo, un supuesto básico es que los flujos observados en las redes carretera y ferroviaria, conocidos por las respectivas matrices origen-destino, muestran la *preferencia revelada* de los usuarios de la red en cuanto a los orígenes donde se acumulan las cargas, los destinos donde se solicitan y las rutas utilizadas.

El modelado en este trabajo considera que los usuarios que mueven carga en la red, pueden ser transportistas privados que mueven carga de su propiedad, o transportistas que mueven cargas para sus clientes, ya sea en el servicio público federal o en el sistema ferroviario. En cualquier caso, se supone que los usuarios toman sus decisiones buscando las mejores rutas respecto a distancia, tiempo o costo, según les convenga, de manera libre y sin acordar entre ellos estas decisiones.

En el movimiento de carga por carretera, una consecuencia natural de las elecciones libres y espontáneas de los usuarios que buscan su mejor ruta es la congestión; ésta surge en los flujos carreteros, ya que los tiempos de traslado aumentan a medida que las vías tienen más ocupación vehicular.

La variación del tiempo de viaje en una ruta conforme cambia el volumen vehicular en la ruta se calcula con funciones volumen-demora (FVD): éstas son funciones matemáticas diseñadas para modelar la relación entre el tiempo de viaje en una ruta y el volumen vehicular que la utiliza. Una de las funciones más usadas para modelar es la función de la Oficina de Caminos Públicos (*Bureau of Public Roads*, BPR), que en este trabajo utiliza parámetros propuestos para el sistema carretero nacional estimados en un estudio previo de funciones volumen-demora (Moreno, Rico y Bustos, 2014).

Las FVD por sí solas no bastan para caracterizar el comportamiento general de una red carretera en la cual se observa congestión. Las decisiones individuales de los usuarios que buscan sus mejores rutas y las interacciones entre ellos ocasionan que las rutas disponibles vayan llenándose y, por consiguiente, aumentando sus correspondientes tiempos de viaje. Nuevos usuarios que entran a la red buscan rutas alternas, repitiendo el comportamiento y congestionando gradualmente esas rutas. Esta situación continúa hasta que se llega a un equilibrio, que se conoce en la literatura como *equilibrio de Wardrop*, o *equilibrio del usuario* (EU), en el cual los tiempos de traslado por cualquier ruta en uso de un origen a un destino dados tendrán el mismo valor, y las rutas que no se usan tendrán mayores tiempos aún sin congestión.

Para el transporte ferroviario, dada la operación controlada que se tiene de los trenes, la búsqueda de ruta para ir de un origen a un destino, se reduce al caso de la ruta más corta. El correspondiente proceso de asignación de flujos ferroviarios con base en la ruta más corta se conoce como *asignación todo o nada*.

Otro aspecto relevante manejado en el presente trabajo para la mejora y extensión de resultados en el modelo es que se han incorporado a la red bimodal datos de pendientes y curvaturas medias en las redes carretera y ferroviaria, y también datos del índice internacional de rugosidad (IRI) para la red carretera. Estos datos son necesarios para la estimación de costos de operación vehicular en ambos modos.

Para el modo carretero, la metodología de referencia es el cálculo de costos de operación vehicular (*Vehicle Operating Costs*, VOC) descrita en el marco del modelo HDM-III (*Highway Design and Maintenance Standards Model*, HDM) del Banco Mundial.

Para el modo ferroviario se utiliza información de referencia de costos de operación estimados para un año dado, por tipo de terreno (plano, lomerío y montaña) actualizados con la referencia del INPP que elabora el Inegi.

Los detalles de estos desarrollos se discutirán en los capítulos siguientes.

2 Mejoras en la red bimodal

El modelo del transporte terrestre de carga pronostica los flujos de carga que se mueven tanto por carretera como por ferrocarril. La red bimodal que se construyó en la primera etapa contiene la representación básica de la red carretera pavimentada, la red ferroviaria actual y los puntos de transferencia entre los dos modos, que suelen ser estaciones de ferrocarril o terminales intermodales donde se da el intercambio de carga entre los modos.

Las características de conectividad, las longitudes de las respectivas redes y la identificación de los nodos relevantes se resolvieron con la construcción de la red bimodal ya referida.

Sin embargo, para estimar costos de operación vehicular y tener representaciones más realistas de los flujos en la red, se debe tomar en cuenta el efecto que la geometría de los caminos tiene en los flujos. Para ello, se requiere agregar información de las pendientes dominantes, así como de las curvaturas en las rutas utilizadas.

Este capítulo describe los detalles de adición de esta información en el modelo del transporte terrestre de carga.

2.1 Atributos para estimar costos operativos

En relación con la red bimodal que representa las carreteras y las líneas férreas, dos atributos importantes a considerar para estimar los costos de operación vehicular son las pendientes y las curvaturas en los tramos de las rutas que utilizan los vehículos. Estas características geométricas del camino afectan tanto el movimiento carretero como el ferroviario.

En el caso particular del movimiento carretero, un atributo adicional que incide en el costo de operación vehicular es la condición de la superficie de rodamiento, medida con el Índice Internacional de Rugosidad (IIR).

En la construcción de la red bimodal del presente proyecto, para la parte carretera se utilizó información oficial de la Red Nacional de Caminos (RNC), tal como la publican Inegi y el IMT; para la parte ferroviaria, en cambio, se usó una representación reciente de la red ferroviaria nacional obtenida de la Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal de la SCT.

En ambos casos, ninguna de estas redes contiene información sobre las pendientes y curvaturas de los tramos representados, y para la parte carretera tampoco se dispone de información del IIR.

Para la inclusión de esta información en la red bimodal a fin de estimar los efectos de la geometría de los caminos en el costo de operación vehicular, se utilizaron, por una parte, los datos de elevaciones del territorio nacional, publicados por el Inegi, y por otra, datos del IIR de la Dirección General de Carreteras de la SCT.

La asignación de valores de la pendiente dominante en los arcos de la red bimodal se realizó mediante un procedimiento que incorpora información sobre las elevaciones del Inegi, tomando como referencia la información de coordenadas de la red bimodal, ya que ésta se encuentra georreferenciada. Un procedimiento similar se utilizó para agregar valores del Índice Internacional de Rugosidad.

Para la asignación de valores de curvaturas medias, se implementó otro procedimiento que calcula secuencialmente las desviaciones angulares al recorrer los arcos o incluso algunas rutas en la red bimodal, y determina un valor promedio representativo para el arco en cuestión. En las secciones siguientes se ofrecen detalles de estos procedimientos.

2.2 Integración de datos geométricos en la red bimodal

La primera adición de datos geométricos a la red bimodal fue la relativa a las pendientes dominantes en los arcos de la misma. La información de base que se utilizó para este atributo fue el Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) que publica el Inegi en su página web. La figura 2.1 muestra la pantalla de acceso para la descarga libre del archivo de elevaciones.

Este producto generado por el Inegi tiene la representación de las elevaciones del territorio continental de México, utilizando valores que indican puntos sobre la superficie del terreno, definidos por coordenadas (X, Y), a las que se agregan los valores de sus elevaciones (Z). La distribución de los puntos en el territorio nacional, así como el espaciamiento entre ellos es regular (Inegi, 2016). La primera versión del CEM apareció en 2003, con base en la información disponible de modelos digitales de elevación en ese entonces.

En 2007, el Inegi agregó los continuos de la red hidrográfica, los cuerpos de agua y curvas de nivel a escala 1: 50 000. En ese mismo año se crearon continuos de bancos de nivel y vértices geodésicos. Con esta información extra, más el uso de un modelo robusto de interpolación, se generó la segunda versión del CEM, terminada en 2010.

La actualización siguiente del CEM, que es la versión actualmente disponible en la página web del Inegi (CEM 3.0), se generó en 2012, en respuesta a la necesidad de poder utilizar insumos más detallados, como imágenes de satélite de alta resolución, y a tener la posibilidad de generar productos cartográficos de mayor detalle, como cartas topográficas a escala 1: 20 000.

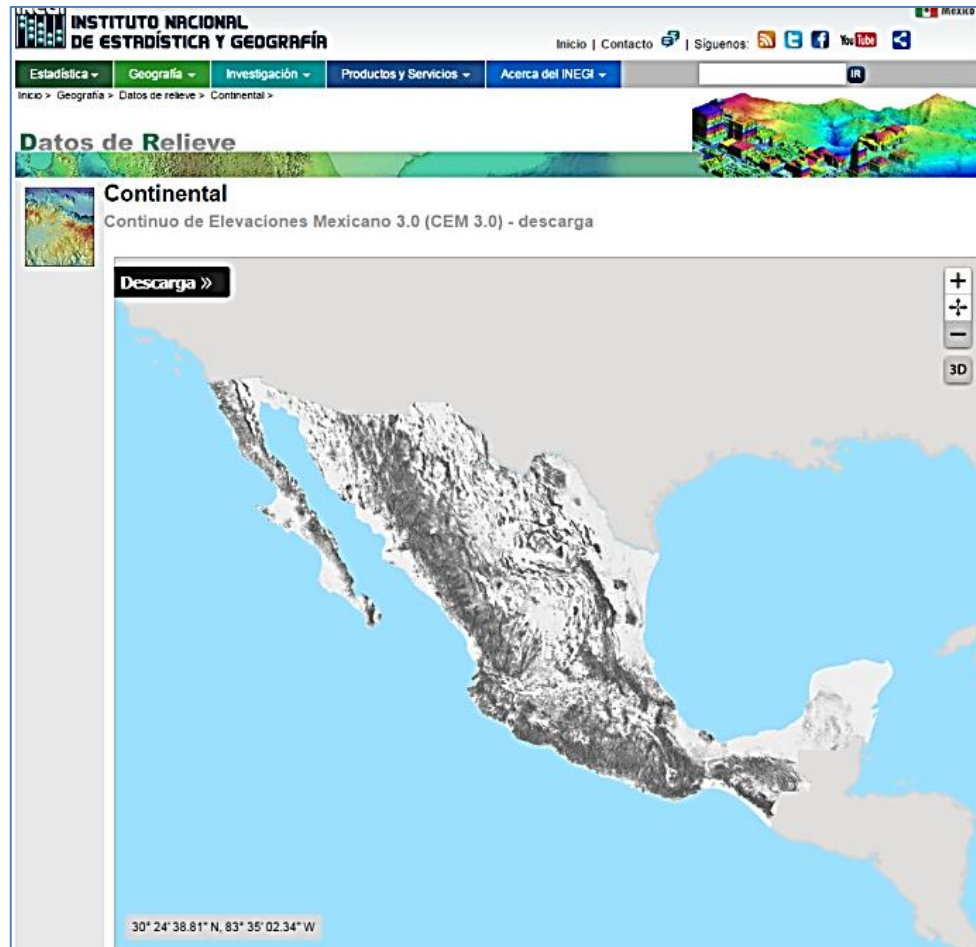


Figura 2.1. Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (Inegi) en línea. Véase: <http://www.Inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuoelevaciones.aspx>.

La principal característica del CEM 3.0 es su resolución de 15 metros, una mejora notable comparada a la resolución de 30 metros de las versiones previas.

A disposición del público por el Inegi desde 2013, la versión del CEM 3.0 es la utilizada en las mejoras efectuadas a la red bimodal en el marco de este proyecto.

Estimación de pendientes en la red bimodal

El procedimiento para asignar pendientes a los arcos de la red bimodal se inició utilizando una segmentación de esta red en tramos de 100 metros. Sobre esta red segmentada, en cada punto de inicio y punto de terminación de los tramos se calculó la elevación con base en el CEM 3.0 del Inegi, que contiene los valores de elevaciones en el territorio nacional sobre una malla con una resolución de cada 15 metros.

Una vez conocidas las elevaciones del punto inicial y el punto final de cada segmento, la pendiente media se calculó dividiendo la diferencia de los valores de las elevaciones de esos puntos entre la correspondiente longitud del arco:

$$\text{Pendiente media} = \frac{(\text{Elevación punto inicio}) - (\text{Elevación punto final})}{\text{Longitud del arco}}$$

Repitiendo el proceso en toda la red carretera, se obtuvieron las estimaciones de pendientes para usarse en los cálculos del costo de operación vehicular.

Para la parte ferroviaria de la red bimodal, las elevaciones y curvaturas se identificaron con la clasificación del terreno en tres tipos (Moreno, E., 1999):

- Plano: pendientes menores o iguales al 1% y curvas suaves, menores a 4 °.
- Lomerío: pendientes entre 1 y 1.5% y curvas moderadas de 4 ° a 6 °.
- Montaña: pendientes entre 1.5 y 3%, con curvas fuertes de 6 ° a 12 °.

El criterio aplicado obedece a que las estimaciones de costo de operación vehicular ferroviario sólo se pudieron obtener para esta clasificación del terreno.

La integración de la información de pendientes en la red bimodal se ilustra en las figura 2.2, que muestra las variaciones de pendiente sobre la carretera México-Cuernavaca, en la curva conocida como “La Pera”. El mapa muestra los rangos de valores de pendientes con un código de color generado con el software Visum.

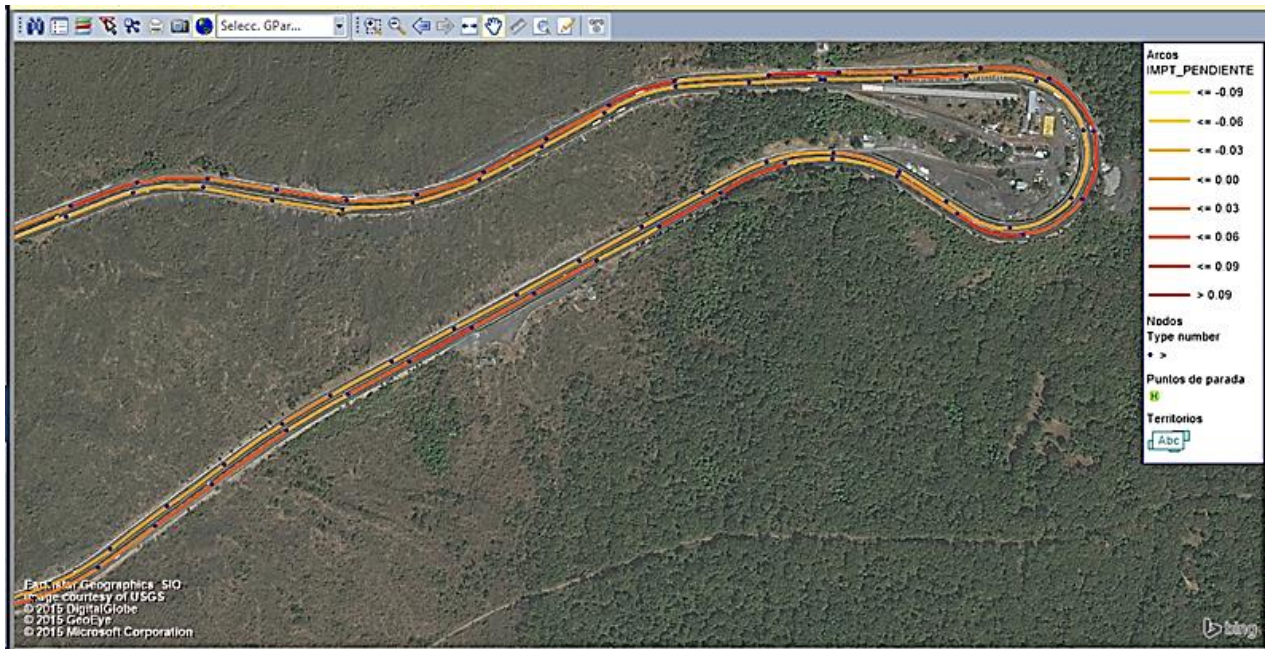


Figura 2.2. Estimación de pendientes. Carretera México-Cuernavaca. Fuente: Elaboración propia.

Estimación de curvaturas

El procedimiento de estimación de curvatura para los arcos de la red se basa en el cálculo de la curvatura media por unidad de longitud en cada tramo considerado. Para ilustrar la idea del cálculo de curvatura, en la figura 2.3 se muestra un esquema de un tramo con curvas que une el punto inicial A con el final B.

Los puntos del camino donde la curvatura cambia corresponden a los puntos de inflexión, que en el esquema están marcados con rojo, mostrándose también rectas tangentes a la curva en esos puntos.

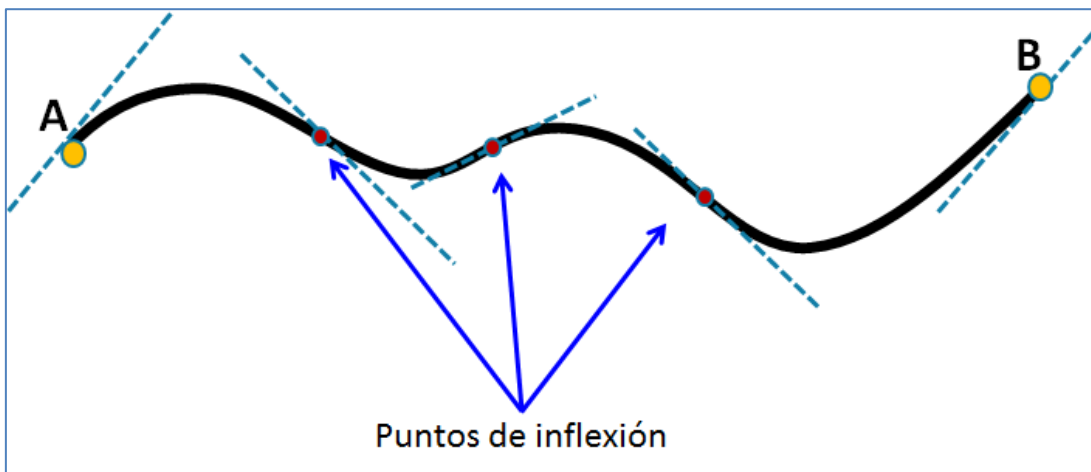


Figura 2.3. Esquema para estimación de curvaturas. Fuente: elaboración propia.

Los puntos de inflexión a lo largo del segmento AB son la referencia básica para determinar cuánto cambia la curvatura mientras se avanza sobre el arco.

Para determinar este cambio, se consideran las variaciones angulares observadas en los puntos de inflexión; estas variaciones se miden con el ángulo suplementario (el complemento a 180 grados) que se forma entre las intersecciones de las rectas tangentes justo en los puntos de inflexión.

En la figura 2.4 se muestran estas intersecciones y se indican los ángulos suplementarios mencionados: C_1 , C_2 , C_3 y C_4 para el esquema de la figura 2.3.

La curvatura media C para el ejemplo se calcula entonces como sigue:

$$C = \frac{C_1 + C_2 + C_3 + C_4}{L_{AB}}$$

donde: C = curvatura horizontal (grados/km); C_k = ángulo suplementario al ángulo de intersección entre las tangentes en puntos de inflexión consecutivos, y L_{AB} es la longitud del tramo entre el punto A y el B.

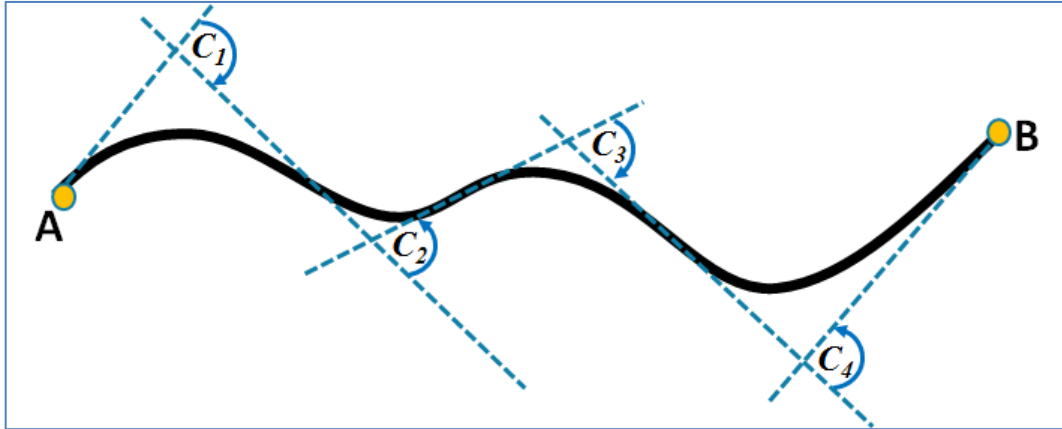


Figura 2.4. Variaciones angulares en los puntos de inflexión de un camino con curvas. Fuente: elaboración propia.

La aplicación práctica del esquema mostrado requiere determinar las rectas tangentes a las curvas del camino justo en los puntos de inflexión.

Si bien conceptualmente el manejo geométrico que se necesita es claro, y podría abordarse con técnicas de cálculo diferencial (suponiendo que se conoce la expresión funcional de la curva), su implementación en el software Visum no es tan directa.

Por la razón anterior, el esquema mostrado se implementó más bien calculando las desviaciones angulares en la sucesión de puntos que integran la curva, utilizando las respectivas coordenadas y midiendo las diferencias de azimuth resultantes, como indica el siguiente procedimiento:

1. Se obtienen las coordenadas de los puntos que integran la curva a analizar.
2. Se calcula el primer azimuth entre las primeras y las segundas coordenadas.
3. Se calcula el segundo azimuth entre las segundas y las terceras coordenadas, y así sucesivamente.
4. Se calcula la diferencia en grados entre el primero y el segundo azimuth; entre el segundo y el tercer azimuth, y así sucesivamente.
5. La curvatura total es la suma de las diferencias de azimuth entre los puntos que integran la curva.

La figura 2.5 ilustra un paso del procedimiento descrito.

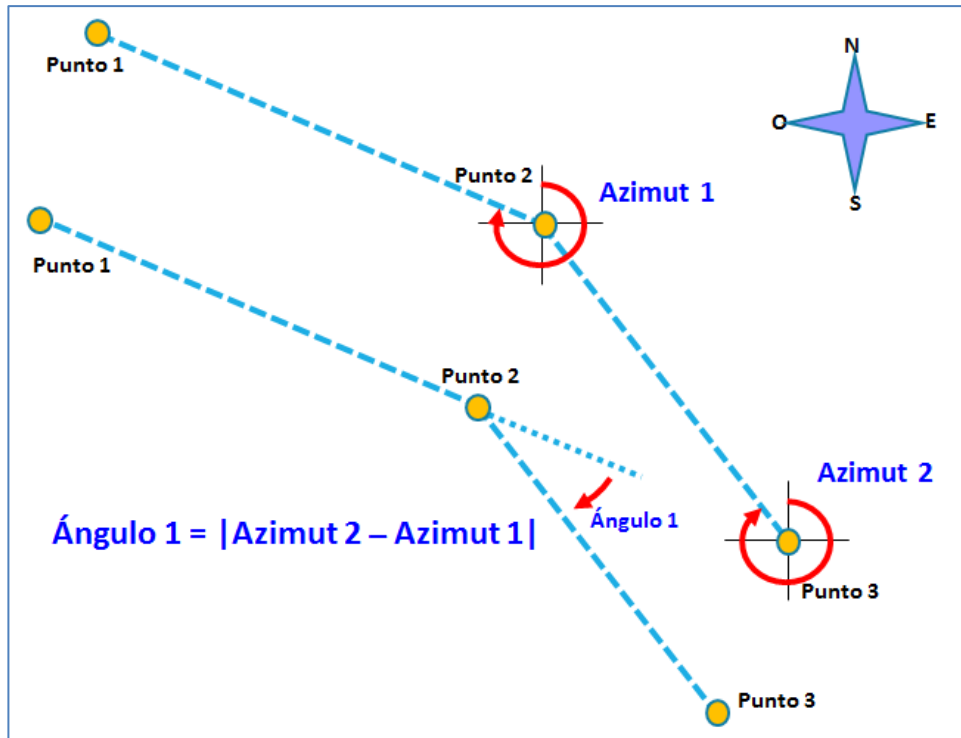


Figura 2.5. Variación angular en puntos de la curva. Fuente: elaboración propia.

Para un tramo de curva dado, se calculan todas las desviaciones angulares, y al final se suman para estimar la curvatura total que hay entre los puntos de entrada salida de la curva. La figura 2.6 ilustra el procedimiento; la figura 2.7 muestra la curvatura total acumulada en la curva de ejemplo, que resulta de 109° .

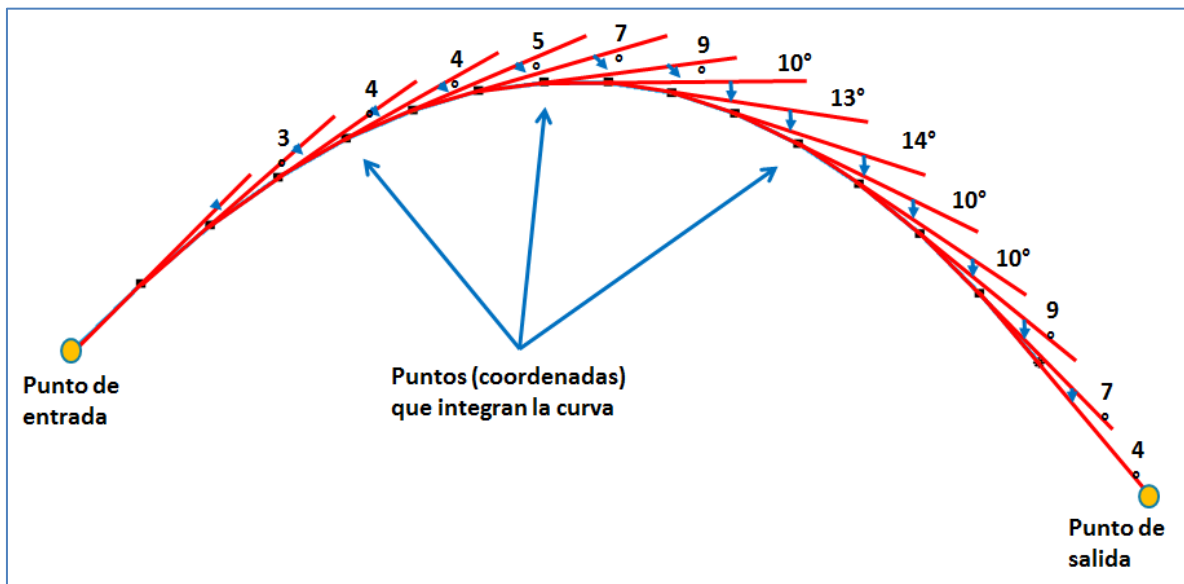


Figura 2.6. Variación angular a lo largo de la curva. Fuente: elaboración propia.

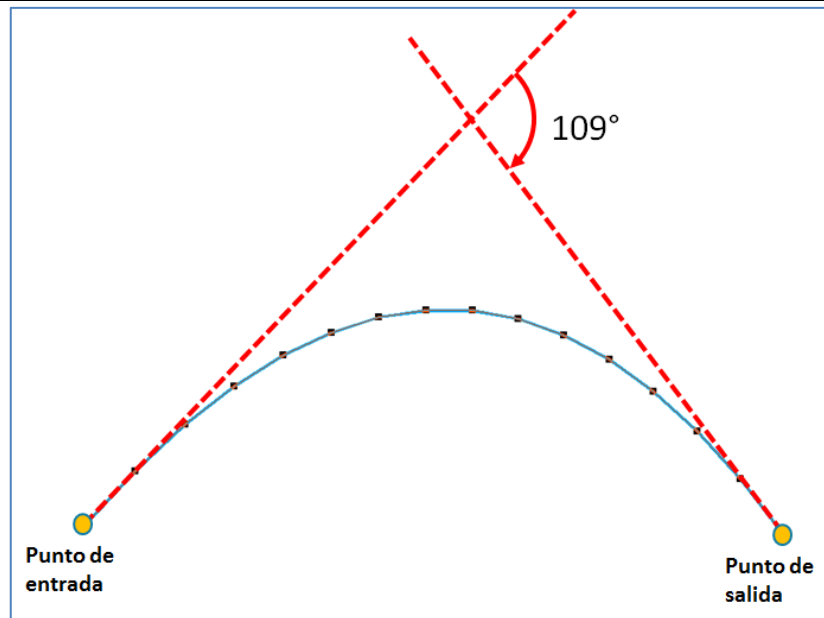


Figura 2.7. Variación angular total en el ejemplo. (Fuente: elaboración propia.)

Un ejemplo de la aplicación de este procedimiento en la curva llamada “La Pera” en la carretera México-Cuernavaca se muestra en la figura 2.8, donde se ve en azul la poligonal sobre la curva utilizada para estimar la curvatura en ese tramo.

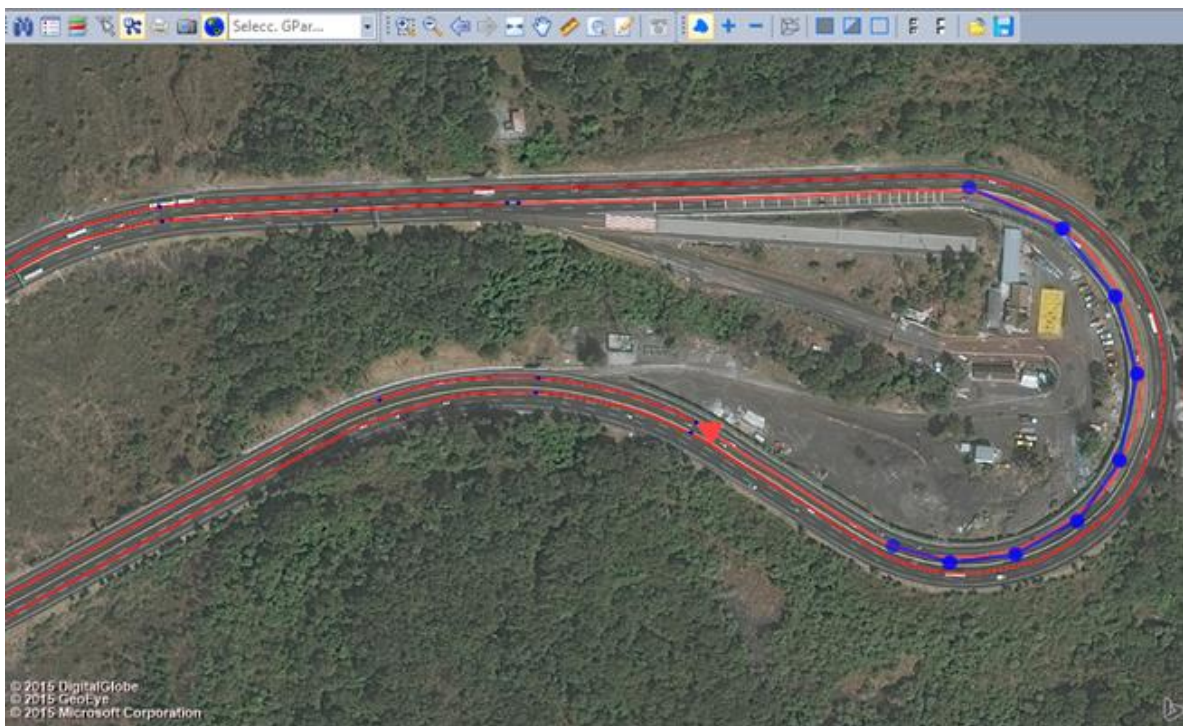


Figura 2.8. Estimación de curvatura, curva “La Pera”. (Fuente: elaboración propia.)

Con estos procedimientos, se agregaron estimaciones de pendientes y curvaturas a las bases de datos que describen la red bimodal. Las figuras 2.9 y 2.10 muestran detalles de estos atributos de la red; la primera ilustra los campos de curvatura y pendiente para la subred carretera, mientras que la segunda muestra el campo de tipo de terreno asociado a la subred ferroviaria de la red bimodal.

RCF 500					
LONGITUD	TRAMO	IRI	SOBREELEV	CURV	PENDIENTE
499.910492	TECPAN DE GALEANA - T. IZQ. TENEXPA	9.000	0.000000	18.040000	2.325000
499.910492	TECPAN DE GALEANA - T. IZQ. TENEXPA	9.000	0.000000	18.040000	2.325000
448.601459	LIM. EDOS. GRO./MICH. - LIM. EDOS. MICH./GRO.	3.000	0.000000	6.747000	2.898000
448.601459	LIM. EDOS. GRO./MICH. - LIM. EDOS. MICH./GRO.	3.000	0.000000	6.747000	2.898000
499.807083	TLAPEHUALA - CIUDAD ALTAMIRANO	3.000	0.000000	16.480000	0.503000
499.807083	TLAPEHUALA - CIUDAD ALTAMIRANO	3.000	0.000000	16.480000	0.503000
455.070735	SAN LUCAS - T.C.(TOLUCA-CIUDAD ALTAMIRANO)	9.000	0.010000	76.270000	0.616000
455.070735	SAN LUCAS - T.C.(TOLUCA-CIUDAD ALTAMIRANO)	9.000	0.010000	76.270000	0.616000
499.887807	OCAMPO - T. DER. EL LIMON	5.000	0.000000	1.162000	1.121000
499.887807	OCAMPO - T. DER. EL LIMON	5.000	0.000000	1.162000	1.121000
500.138942	T. DER. LOS AZUFRES - T. DER. ZINAPECUARO	3.000	0.000000	0.829000	7.224000
500.138942	T. DER. LOS AZUFRES - T. DER. ZINAPECUARO	3.000	0.000000	0.829000	7.224000
499.850660	MARAVATIO DE OCAMPO - QUERENDARO	5.000	0.000000	9.218000	1.283000
499.850660	MARAVATIO DE OCAMPO - QUERENDARO	5.000	0.000000	9.218000	1.283000
499.913947	T.C.(MARAVATIO-ACAMBARO) - CASETA DE COBRO ZINAPECUARO	2.000	0.000000	0.299000	2.618000
499.913947	T.C.(MARAVATIO-ACAMBARO) - CASETA DE COBRO ZINAPECUARO	2.000	0.000000	0.299000	2.618000
500.045861	LIM. EDOS. MICH./GTO. - ACAMBARO	3.000	0.000000	0.244000	0.602000
500.045861	LIM. EDOS. MICH./GTO. - ACAMBARO	3.000	0.000000	0.244000	0.602000

Figura 2.9. Estimaciones de curvatura y pendiente en los atributos de tramos carreteros. Fuente: elaboración propia.

Dataview1 - RED_BIM_15						
MODO	PENDIENTE	TERRENO_TIPO	Pendiente_PROM	G_Curv	ID_ANT	SUBMODDO_TIPO
F.C. DIESEL	0.70	PLANO	0.75	6.00	708	VIA DE FERROCARRIL
F.C. DIESEL	0.70	PLANO	0.00	6.00	711	VIA DE FERROCARRIL
F.C. DIESEL	1.20	LOMERIO	0.00	4.00	1060	VIA DE FERROCARRIL
F.C. DIESEL	1.20	LOMERIO	1.09	--	738	VIA DE FERROCARRIL
F.C. DIESEL	1.20	LOMERIO	1.00	3.00	758	VIA DE FERROCARRIL
F.C. DIESEL	1.20	LOMERIO	1.00	3.00	758	VIA DE FERROCARRIL
F.C. DIESEL	0.70	PLANO	0.73	2.58	1373	VIA DE FERROCARRIL
F.C. DIESEL	0.70	PLANO	0.73	2.58	1373	VIA DE FERROCARRIL
F.C. DIESEL	0.70	PLANO	0.50	2.00	506	CONECTOR DE FERROCARRIL
F.C. DIESEL	0.70	PLANO	0.50	2.00	506	VIA DE FERROCARRIL
F.C. DIESEL	1.20	LOMERIO	1.00	1.00	2258	VIA DE FERROCARRIL
F.C. DIESEL	1.20	LOMERIO	1.09	--	3681	
F.C. DIESEL	0.70	PLANO	0.50	5.44	2145	VIA DE FERROCARRIL
F.C. DIESEL	0.70	PLANO	1.00	3.00	2165	VIA DE FERROCARRIL
F.C. DIESEL	0.70	PLANO	0.50	5.44	2145	CONECTOR DE FERROCARRIL
F.C. DIESEL	1.70	MONTAÑA	2.00	10.00	18	VIA DE FERROCARRIL
F.C. DIESEL	0.70	PLANO	0.00	6.00	711	VIA DE FERROCARRIL
F.C. DIESEL	0.70	PLANO	0.75	6.00	708	VIA DE FERROCARRIL
F.C. DIESEL	1.20	LOMERIO	0.00	2.30	689	VIA DE FERROCARRIL
F.C. DIESEL	1.20	LOMERIO	1.09	--	738	VIA DE FERROCARRIL
F.C. DIESEL	1.20	LOMERIO	0.00	4.00	1060	VIA DE FERROCARRIL
F.C. DIESEL	1.20	LOMERIO	1.29	3.12	1402	VIA DE FERROCARRIL
F.C. DIESEL	0.70	PLANO	1.00	1.00	40	VIA DE FERROCARRIL

Figura 2.10. Asignación de tipo de terreno a los atributos de tramos ferroviarios. Fuente: elaboración propia..

2.3 Datos de condición superficial en carreteras

La condición superficial de la red carretera es otro elemento importante para calcular los costos de operación vehicular. El parámetro para esta condición es el Índice Internacional de Rugosidad (IIR), un elemento de cálculo importante en la metodología de costos de operación vehicular para carreteras del Banco Mundial, implementada en el modelo Vehicle Operating Costs (VOC) que forma parte del sistema HDM-III.

La integración del IIR en el modelo se realizó con información del año 2010, generada por la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT. La información de IIR se añadió a la red carretera federal segmentada cada 100 metros, buscando correspondencias entre el nombre de las carreteras de la base de datos de la Red Nacional de Caminos 2015. Para los casos no encontrados en estas correspondencias, se asignó un valor de IIR igual a 4.0.

La figura 2.11 enseguida muestra un mapa de la red federal de carreteras con los niveles de IIR que se usaron en el modelo de asignación.

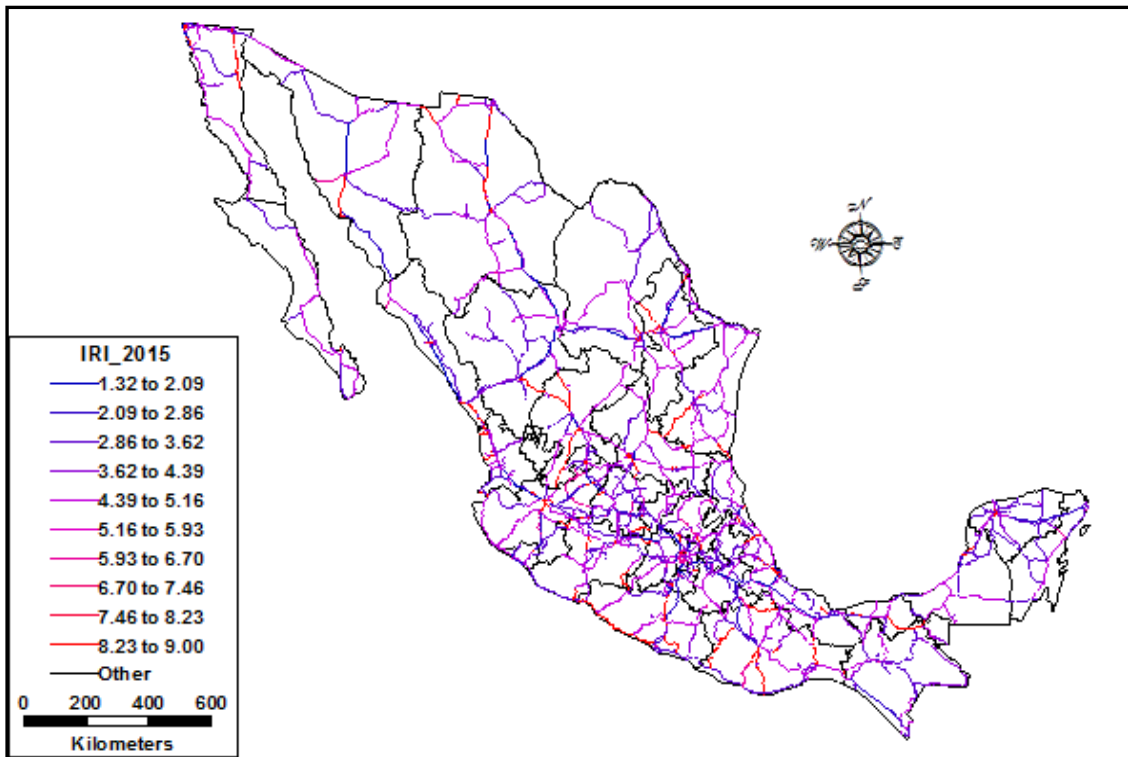


Figura 2.11. Valores de IIR-2010 para la modelación en la red carretera federal. (Con base en información de la Dir. Gral. de Serv. Técnicos-SCT)

3 Estimación de costos operativos

Los costos de operación de los vehículos en la red son un elemento central en la mejora de los pronósticos de asignación de flujos en la red. A grandes rasgos, estos costos dependen tanto de los tipos vehiculares considerados —con distintos consumos de combustible, lubricantes, pago de operadores, etc.— como de las características de las rutas utilizadas por estos vehículos, que presentan diversas pendientes, curvaturas, superficies de rodamiento y número de carriles disponibles.

Considerando estos factores, es de esperarse que una buena modelación de los flujos refleje las diferencias de costo entre las rutas que se mueven en terrenos relativamente planos, con poca sinuosidad, y aquellas que tienen que cruzar áreas montañosas o con muchas curvas.

La inclusión de procedimientos adecuados para estimar los costos de operación vehicular tiene el objetivo de generar pronósticos más realistas en el modelo de asignación que se ha desarrollado en etapas anteriores. Los detalles de la metodología y los insumos de datos necesarios se discuten en este capítulo.

3.1 Estimación de costos en carretera: el modelo HDM-VOC

En la última década del siglo XX, el Banco Mundial condujo una serie de trabajos relativos al diseño y mantenimiento de carreteras para los países en desarrollo, que llevaron al sistema Highway Development and Management (HDM), cuya versión más reciente es la número 4, y que se usa ampliamente en ambientes de planeación de la infraestructura carretera.

El HDM dispone de un módulo de costos de operación vehicular (COV), llamado Vehicle Operating Costs Model (HDM-VOC), que es un programa computacional para estimar costos operativos en las carreteras, con base en datos del tipo vehicular, su utilización y costos unitarios, así como las características del camino por el que circula (World Bank, 2015).

Las características del camino que el HDM-VOC toma en cuenta, son:

- g) Tipo de superficie (pavimentada /no pavimentada).
- h) Índice de rugosidad.
- i) Perfil vertical (proporciones de pendientes positivas y negativas).
- j) Perfil horizontal (curvaturas y sobreelevaciones promedio).

- k) Altitud promedio.
- l) Número de carriles.

Para un tipo vehicular determinado, el HDM-VOC calcula los costos operativos siguiendo los cuatro pasos básicos siguientes (Archondo y Faiz, 1994):

5. Se calcula la velocidad de operación promedio del vehículo.
6. Se calculan las cantidades de recursos utilizados por cada 1,000 veh-km de los siguientes elementos:
 - a. consumo de combustible
 - b. consumo de lubricantes
 - c. desgaste de llantas
 - d. tiempo de operador
 - e. tiempo de pasajeros (si hay)
 - f. tiempo de retención de la carga
 - g. mano de obra de mantenimiento
 - h. refacciones
 - i. depreciación
 - j. intereses
 - k. gastos generales
7. Los costos unitarios se aplican al consumo de los recursos y se obtiene el costo operativo por cada 1,000 veh-km para cada elemento de costo.
8. Se suman los costos operativos de cada elemento de costo y así se integra el costo total de operación vehicular por cada 1,000 veh-km.

La velocidad pronosticada V del vehículo se estima con un procedimiento que considera las características generales de la geometría del camino y la condición de la superficie de rodamiento, para generar un valor representativo de la velocidad del vehículo.

En el cálculo se consideran cuatro velocidades límite o de restricción, referidas por las variables V_{DRIVE} , V_{BRAKE} , V_{CURVE} , V_{ROUGH} y V_{DESIR} , descritas a continuación (Archondo y Faiz, 1994):

- V_{DRIVE} es la velocidad límite con base en la pendiente del camino y la potencia del motor. Se calcula tanto para la pendiente en subida (V_u) como para la pendiente en bajada (V_d).
- V_{BRAKE} es la velocidad límite con base en la pendiente del camino y la capacidad de frenado del vehículo.
- V_{CURVE} es la velocidad límite determinada por la curvatura del camino.

- VROUGH es la velocidad límite con base en el índice de rugosidad del camino.
- VDESIR se refiere a la velocidad deseada sin restricción alguna, considerando razones económicas, de seguridad, psicológicas y otras.

Estas velocidades límite son funciones matemáticas de factores que pueden ser características del vehículo como la potencia del motor, la capacidad de frenado o la carga transportada, o también características del camino como pueden ser las pendientes, la rugosidad o la curvatura.

En la figura 3.1 se muestra un ejemplo de cómo cambian los valores de VDRIVE (que depende de la pendiente y la potencia del motor), VBRAKE (que depende de la pendiente y el frenado) y VELOCIDAD, que es la velocidad resultante estimada para un automóvil, considerando varios valores de pendiente, con valores positivos para movimientos cuesta arriba y negativos para recorridos cuesta abajo.

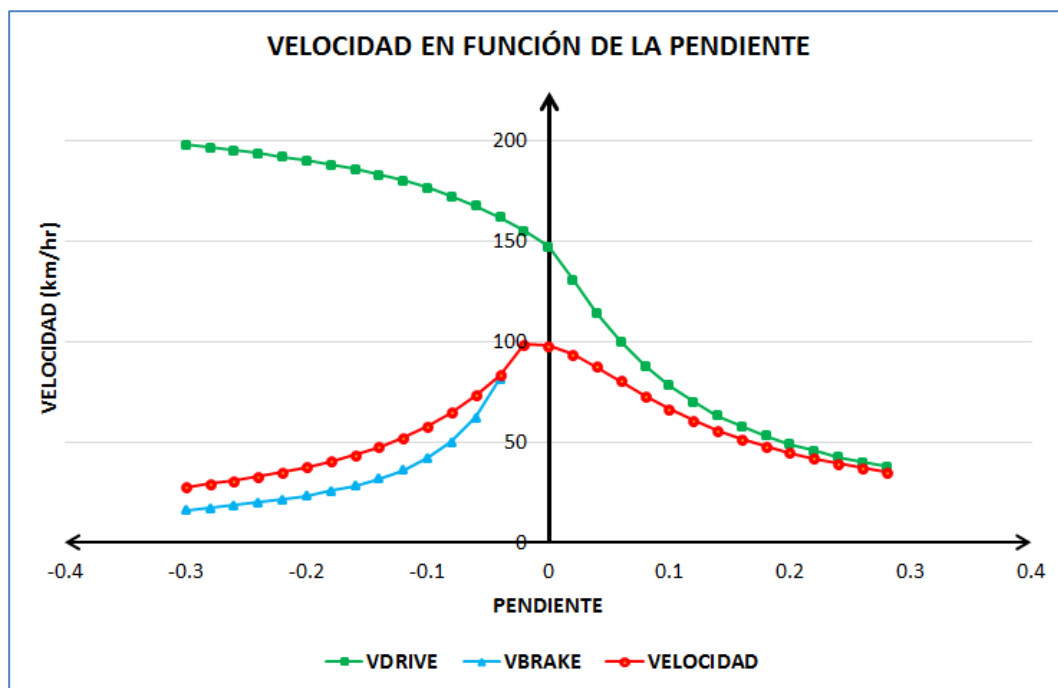


Figura 3.1. Relaciones del modelo COV para velocidad vs pendiente del camino para un automóvil. (Elaboración propia).

La figura 3.1 muestra cómo las ecuaciones de velocidad vs pendiente indican un aumento de la velocidad resultante del vehículo en terrenos con baja pendiente y una disminución de esta velocidad conforme aumenta la pendiente, tanto cuesta arriba como cuesta abajo.

Del mismo modo, se muestra la variación de la velocidad VDRIVE que muestra la velocidad límite que resultaría considerando sólo pendiente y potencia del motor y que tiene altos valores para pendientes negativas (cuesta abajo) y va disminuyendo consistentemente conforme aumenta la pendiente a valores

positivos. El esfuerzo del vehículo para el frenado, reflejado en la velocidad VBRAKE, que es la velocidad límite también se muestra en la figura 3.1, variando consistentemente desde valores pequeños para pendientes negativas considerables hasta valores mayores para pendientes menos pronunciadas.

Las variaciones de la velocidad vs la rugosidad de la superficie de rodamiento se ilustran en la figura 3.2, que muestra cómo varía la velocidad resultante (VELOCIDAD) en un camión articulado T3S2 a medida que aumenta el IIR, y también se muestra la variación de VROUGH, que es la velocidad límite considerando solamente la rugosidad del camino; esta velocidad se reduce consistentemente a medida que aumenta el valor del IIR.

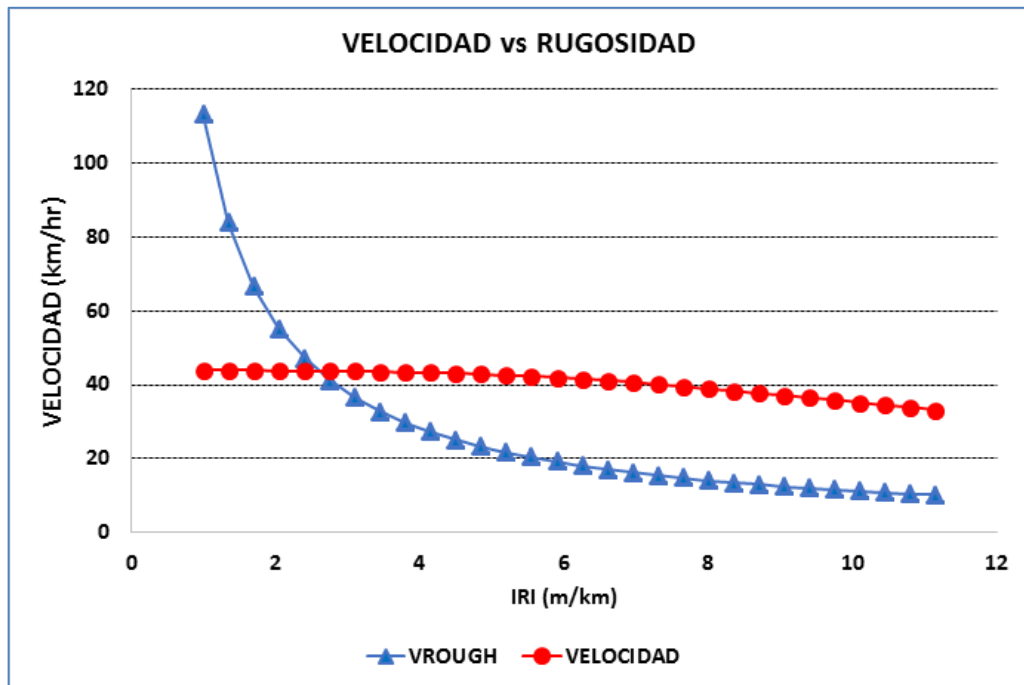


Figura 3.2. Relaciones del modelo COV para velocidad vs rugosidad del camino para un articulado T3S2. (Elaboración propia).

Tanto el cálculo de VCURVE como de VDESIR depende del tipo de superficie, y VCURVE depende, a su vez, del peso bruto vehicular.

El índice de rugosidad es un dato para el cálculo de VDRIVE, VBRAKE, VROUGH, consumo de combustible, consumo de lubricantes, desgaste de llantas, refacciones y mano de obra de mantenimiento.

El cálculo de VDRIVE también depende de algunas características del vehículo, como son la potencia del motor, el peso bruto vehicular y el área de la proyección frontal del vehículo, requerida para estimar la resistencia del aire al movimiento. El cálculo de VBRAKE también depende de la capacidad de frenado y del peso bruto vehicular.

Por otra parte, los siguientes elementos, a su vez, dependen de la velocidad pronosticada V :

- consumo de combustible
- desgaste de llantas.
- tiempo de operador
- tiempo de pasajeros
- tiempo de retención de la carga
- depreciación
- intereses

La figura 3.3 muestra un ejemplo de la variación del consumo de combustible, expresado en litros por kilómetro recorrido, conforme varía la velocidad de un automóvil, donde se ilustra el comportamiento esperado: mayores consumos a bajas o altas velocidades, y un consumo mínimo en una velocidad “económica” entre 80 km/h y 90 km/h para un automóvil.

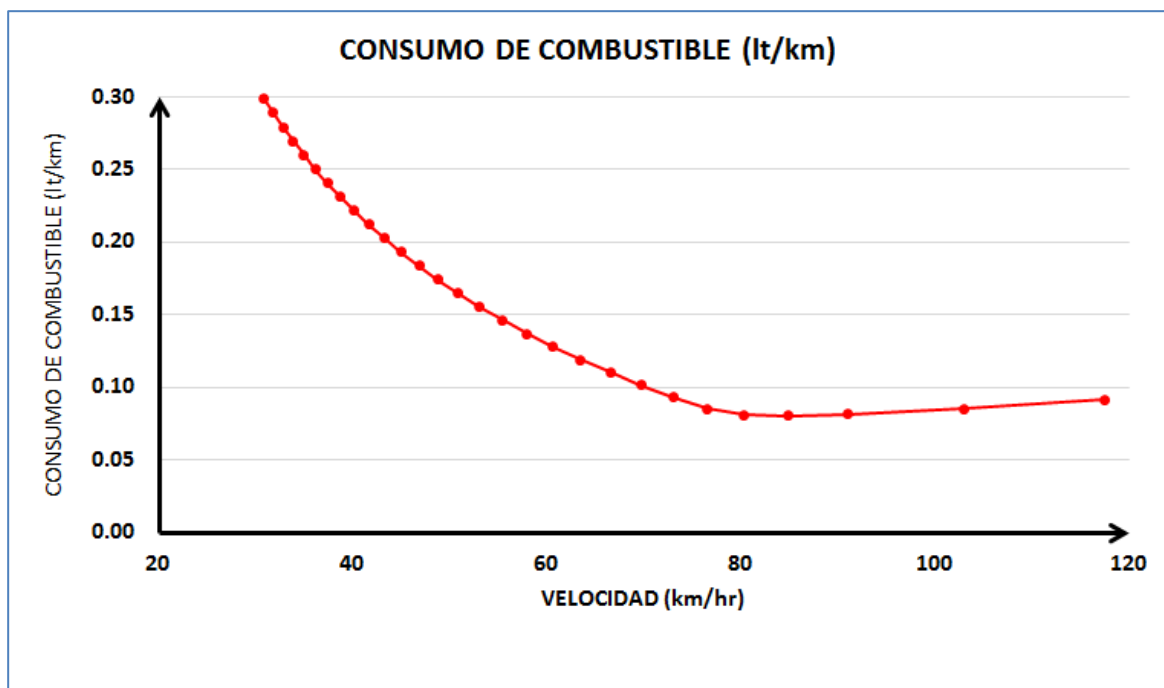


Figura 3.3. Consumo de combustible vs velocidad, estimadas para un automóvil con las ecuaciones del COV. Fuente: elaboración propia.

Otras facilidades que ofrece el paquete original incluyen la posibilidad de generar tablas de análisis de sensibilidad que muestran las variaciones de los costos según se cambian diversos parámetros, el cálculo del costo de operación vehicular para una flota vehicular, y la estimación de un modelo de regresión que relaciona VOC con rugosidad.

Un aspecto que hay que señalar es que los costos de operación vehicular que calcula el modelo del HDM-VOC consideran el movimiento de los vehículos a flujo libre, en ausencia de congestión. La descripción detallada de todas las relaciones usadas por el HDM-VOC se encuentra en la referencia del Technical Paper No. 234 del Banco Mundial (Archondo y Faiz, 1994), y son estas relaciones las que se utilizan en la estimación de costos de operación vehicular para la parte carretera de la red bimodal para el modelo de asignación de flujos de transporte terrestre en México.

La estimación de costos para el caso de movimientos ferroviarios se describe en las secciones siguientes.

3.2 Ajustes del modelo para carreteras mexicanas

Una parte esencial en la mejora del modelo de asignación de flujos en la red bimodal del transporte terrestre de carga en México es el ajuste de los datos de entrada a las ecuaciones del modelo HDM-VOC. Entre los datos que se usaron como referencia están los consumos de combustible típicos de camiones de carga en México, que se compararon con los pronosticados por el HDM-VOC.

El HDM-VOC calcula el consumo de combustible como el número de litros consumidos por cada 1,000 veh-km, denotado FL, y el costo unitario del combustible mediante la relación:

$$\text{Costo por 1,000 veh-km} = \text{FL} \times \text{costo unitario por litro}$$

El submodelo de pronóstico de combustible usa el consumo unitario de combustible, denotado por UFC, en mililitros por segundo, con el supuesto teórico de que el consumo es una función de la potencia entregada por el motor, HP (caballos de potencia) y la velocidad angular del motor en revoluciones por minuto (RPM). La relación de cálculo es la siguiente:

$$\text{FL} = 1000\alpha_1\alpha_2 [\text{UFCu} \times \text{LP} / \text{Vu} + \text{UFCd} \times (1 - \text{LP}) / \text{Vd}]$$

donde:

UFCu es el consumo unitario pronosticado para la parte del camino con pendiente positiva, en ml/s.

UFCd es el consumo unitario pronosticado para la parte del camino con pendiente negativa, en ml/s.

LP es la proporción del camino con pendiente positiva, expresada como fracción.

α_1 es el factor de eficiencia energética relativo.

α_2 es el factor de ajuste de combustible.

V_u , V_d son las correspondientes velocidades estimadas para pendiente positiva y negativa respectivamente, en m/s.

El coeficiente α_1 se introdujo al HDM-VOC para que los cálculos se ajustaran a los tipos vehiculares más recientes, ya que el modelo original manejaba datos de vehículos típicamente usados en Brasil en la década de los años 1970. Para estos modelos vehiculares originales, el valor α_1 es prácticamente uno, y se recomienda utilizar valores más bajos a medida que la eficiencia tecnológica del vehículo modelado sea mejor respecto a los modelos del estudio brasileño original.

Del mismo modo, el coeficiente α_2 se introdujo al modelo para considerar las diferencias entre las condiciones experimentales de operación de los vehículos y las condiciones de operación reales en los caminos utilizados.

Para el caso de las carreteras mexicanas, se obtuvo una muestra de rendimientos de las configuraciones vehiculares que mayoritariamente circulan moviendo carga: C2, C3, T3S2, T3S3 y T3S2R4, declarados por transportistas que utilizan dichas configuraciones y prueban sus esquemas de costos en el Sistema de Costos en el Autotransporte de Mercancías (SICAM) que el IMT ofrece con acceso libre en su página web.

Los valores promedio de rendimiento obtenidos se muestran en la tabla 3.1 enseguida.

Tabla 3.1. Rendimientos típicos de camiones de carga en México

Rendimientos promedio (km/l)		
Tipo vehicular	Cargado	Vacío
C2	3.629	4.322
C3	3.271	3.760
T3S2	2.872	3.548
T3S3	2.001	3.142
T3S2R4	1.662	2.726

Fuente: elaboración propia con datos del SICAM-IMT.

Con base en esta muestra de rendimientos, se ajustaron las ecuaciones de consumo de combustible del HDM-VOC, y se encontraron valores de α_1 y α_2 consistentes con los resultados del cálculo de costos.

3.3 Estimación de costos en movimientos ferroviarios

Para estimar los costos de operación del modo ferroviario se utilizó la referencia de Centeno y Mendoza (2003), quienes utilizan una metodología desarrollada por la extinta paraestatal Ferrocarriles Nacionales de México, llamada “Metodología para el cálculo de costos de operación ferroviaria”. En esta metodología se tomaban en cuenta los siguientes aspectos:

- amortización de las locomotoras;
- amortización de los carros;
- salarios de la tripulación;
- costo de combustibles y lubricantes;
- costos de mantenimiento de vía y equipo, y
- otros costos secundarios (reparaciones, salarios de operadores, etc.).

Partiendo de esta base, y con los costos medios de operación ferroviaria calculados para 2002 (Centeno y Mendoza, 2003), se estimaron costos para un tren de 22 carros cargados, con un peso promedio de 1,320 toneladas. Los costos se calcularon para los tres tipos de terreno: plano, lomerío y montañoso, a fin de tener una aproximación mejorada a la operación ferroviaria.

Los costos estimados se actualizaron mediante un seguimiento a sus aumentos promedio en el tiempo con base en la calculadora de inflación del Inegi, la cual considera el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN) y de donde se eligió la ruta: actividades terciarias-transportes-correo y almacenamiento-transporte por ferrocarril para el período 2002-2014. Esta ruta representa básicamente el Índice Nacional de Costos al Productor para el movimiento de carga ferroviaria, ya que en la actualidad el movimiento de pasajeros no está directamente clasificado debido a su mínima participación en el transporte por ferrocarril.

La figura 3.4 muestra la inflación registrada con base en el INPP para el periodo 2002-2014.

Calculadora de inflación [Ayuda](#)

La calculadora de inflación le permite conocer cual ha sido la inflación en el período que usted defina. Lo único que debe hacer es indicar el período y oprimir el botón de calcular.

Cálculo de inflación

Índice nacional de precios productor. Base junio 2012=100 (SCIAN 2007)
Producción total según actividad económica (finales más intermedios clasificación SCIAN 2007) > Actividades terciarias > 48-49 Transportes > correos y almacenamiento > 482 Transporte por ferrocarril > 4821 Transporte por ferrocarril
 Período: Ene 1981 - Feb 2015 Índice base junio 2012 = 100

Inflación en un período determinado

Seleccione el período de interés y oprima el botón de calcular.

DE A
Dic ▼ / 2002 ▼ Dic ▼ / 2014 ▼

Inflación de Dic 2002 a Dic 2014: 215.81%

Tasa Promedio Mensual de Inflación de Dic 2002 a Dic 2014: 0.80%

Calcular
Cerrar

Figura 3.4. Calculadora de índice de precios al productor para el sector transporte de carga por ferrocarril para el periodo 2002-2014. Fuente: Inegi)

Como puede observarse, en este periodo se presentó una inflación acumulada de 215.81%. Esta tasa se aplicó a los costos ferroviarios registrados en 2002 para actualizarlos a 2014, como se muestra en la siguiente tabla.

Terreno	Costo (USD)/tren-km		USD/ton-km
	año 2002	año 2014	
Plano	13.37	28.85	0.022
Lomerío	22.62	48.82	0.037
Montañoso	33.41	72.10	0,055
tasa		215.81%	

Esta estimación tiene valores acordes con datos de un reporte de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD, 2014), en el cual las tarifas promedio reportadas por tonelada-kilómetro en el periodo 2011-2012 fueron de 3.8 centavos de dólar en la empresa Kansas City Southern Mexico (KCSM) y de tres centavos de dólar en la empresa Ferromex.

4 Modelación de escenarios

El análisis de escenarios es una de las tareas básicas que el modelo puede efectuar para apoyar la planeación del sistema de transporte. Dos ensayos de modelación de escenarios se abordan en este capítulo. El primero es la estimación de los flujos potenciales de tráfico de carga esperados en nuevos tramos de la red que aún no se construyen y que son del interés del sector transporte. El segundo es un análisis comparativo de los flujos de tráfico de carga esperados en corredores importantes de la red a los cuales se han hecho mejoras, considerando la situación anterior a esas mejoras y la condición después de ellas.

4.1 Estimación de flujos para nuevos proyectos

De los proyectos recientes con interés para el sector transporte, en esta sección se muestran dos casos explorados con el modelo en su estatus actual. El primero corresponde al tramo corto de Aguascalientes a Guadalajara en la red ferroviaria, y el segundo corresponde a una propuesta de rutas nuevas o mejoradas en el estado de Michoacán, en un área con posibilidades de ubicarse en las Zonas Económicas Especiales.

Tramo corto Aguascalientes-Guadalajara

Este tramo propuesto como mejora de la red ferroviaria nacional está incluido en el Plan Nacional de Infraestructura (PNI), para el cual consideró originalmente una inversión de 11 mil 593 millones de pesos. Anunciado para iniciar su construcción en 2015 y finalizar en 2017, se espera que el proyecto contribuya a la eficiencia del transporte de carga en los corredores ferroviarios Manzanillo- Tampico y Manzanillo-Nuevo Laredo. Este tramo, de aproximadamente 188 km de longitud, forma parte de los compromisos de gobierno mencionados en el PNI (Quintana, M., 2014a).

Una primera estimación del impacto que podría tener este tramo corto, en palabras de Lorenzo Reyes Retana, director general de Proyectos Corporativos de Ferromex, es la siguiente:

“Actualmente para cubrir esa ruta (Guadalajara-Aguascalientes) un tren tiene que ir de Guadalajara a Irapuato y después a Aguascalientes y con este acortamiento, que tiene cerca de 200 kilómetros (km), se ahorrarían más de 100 km de recorrido y como 10 horas en tiempo de traslado” (T21, 2016).

En el mismo sentido, en el marco de la XX Reunión Nacional de Ingeniería de Vías Terrestres, celebrada en Acapulco, Guerrero, en julio de 2014, se mencionaron

como beneficios esperados un ahorro de 16 horas en el trayecto original y una demanda esperada de aproximadamente 9'600,000 toneladas anuales (Quintana, M, 2014b).

Aunque el trazo para el proyecto aún no se ha hecho público ni por la SCT ni por Ferromex, con información básica de elevaciones del territorio nacional que publica el Inegi, y considerando posibles obstáculos geográficos, se agregó un tramo representativo en la red bimodal para modelar el proyecto, como se ilustra en la figura 4.1, con la línea punteada que va de Guadalajara a Aguascalientes.



Figura 4.1. Asignación de flujo potencial en el tramo corto Guadalajara-Aguascalientes. Fuente: elaboración propia.

La longitud de este tramo representativo resultó de 209 km, aproximadamente un 11% mayor a la longitud de 188 km anunciada en diversos foros en 2014. Con

este nuevo tramo añadido a la red, se corrió el modelo de asignación para estimar el potencial de flujo resultante en el nuevo tramo.

La figura 4.1 también muestra el resultado del modelo de asignación, con información origen-destino ajustada al año 2013. El flujo estimado es de aproximadamente 5.8 millones de toneladas anuales sobre el nuevo tramo.

En el ejercicio de asignación mostrado se consideró solamente el tiempo de traslado en la red bimodal, mismo que, por lo general, es mejor para los flujos carreteros. Sin embargo, el estimado de 5.8 millones de ton/año representa un 60.4% del flujo que se declaró como esperado en los distintos foros donde el proyecto se ha publicitado.

Con el ajuste de las matrices origen-destino para años posteriores a 2013 que se prevé para las etapas futuras del modelo, y la consideración adicional de incluir costos de operación tanto en carretera como en ferrocarril, las estimaciones mostradas muy probablemente mejorarán y darán resultados más cercanos a los flujos esperados que circularán por el nuevo tramo.

Rutas de Zonas Económicas Especiales en Michoacán

En junio de 2016, la Presidencia de la República publicó en el *Diario Oficial de la Federación* (DOF), la Ley Federal de Zonas Económicas Especiales, que tiene entre sus objetivos declarados:

“...impulsar el crecimiento económico sostenible que, entre otros fines, reduzca la pobreza, permita la provisión de servicios básicos y expanda las oportunidades para vidas saludables y productivas, en las regiones del país que tengan mayores rezagos en desarrollo social, a través del fomento de la inversión, la productividad, la competitividad, el empleo y una mejor distribución del ingreso entre la población” (DOF, 1 de junio de 2016).

Una zona económica especial (ZEE) se define como un área geográfica bien delimitada, en una región que tenga ventajas naturales y logísticas para desarrollar una alta productividad, la cual a su vez beneficiará a la población local dándole las mismas posibilidades de progreso y bienestar que tiene el resto del país. Los beneficios esperados para una ZEE incluyen facilidades fiscales y laborales, marcos regulativos ágiles, sistemas aduaneros especiales, construcción de infraestructura de primer nivel, programas de capacitación y estímulos asociados a condiciones preferenciales.

El proyecto federal de ZEE ha identificado tres áreas geográficas susceptibles de desarrollo: a) el área del puerto de Lázaro Cárdenas, incluidos municipios vecinos de Michoacán y Guerrero; b) el corredor del istmo de Tehuantepec, abarcando los

puertos de Coatzacoalcos en Veracruz y Salina Cruz en Oaxaca, y c) la zona de Puerto Chiapas. La figura 4.2 muestra estas áreas geográficas (SE, 2016).



Figura 4.2. Regiones de las ZEE. (Fuente: Secretaría de Economía.)

Para la ZEE del puerto de Lázaro Cárdenas, el gobierno del estado de Michoacán se ha interesado en desarrollar un eje carretero que conecte a la Ciudad de México (CDMX) con el puerto. Las rutas actuales disponibles en el eje son dos:

- a) Desde CDMX, pasando por Atlacomulco, Morelia y Uruapan, y
- b) Desde CDMX yendo por Toluca, Tejupilco de Hidalgo, Ciudad Altamirano e Ixtapa.

La figura 4.3 muestra estas dos rutas calculadas para un camión C3 con la aplicación MAPPIR (dic/2016), que ofrece en línea la SCT; la ruta a) se muestra en color verde y la b) en rojo. La ruta sugerida por MAPPIR corresponde a la de menor tiempo y considera el pago de peajes. Las distancias, tiempos y costos se aprecian también en la figura 4.4.

La ruta a) tarda 6 h 22 min, cubre 611.54 km y tiene peajes por \$1,323.00; la ruta b) tarda 7 h 35 min, cubre 552.93 km y no tiene peajes. La figura 4.4 también muestra una estimación del gasto en combustible, con \$1,221.29 para la ruta a) y \$1,104.28 para la ruta b).

Una primera propuesta de caminos alternos considerada por el gobierno del estado de Michoacán son dos nuevas rutas que pasan por Huetamo, Michoacán.

Una de ellas con un nuevo tramo desde Huetamo a Las Cañas y luego hacia Lázaro Cárdenas; la otra con otro nuevo tramo desde Huetamo a Infiernillo para luego dirigirse hacia Lázaro Cárdenas.

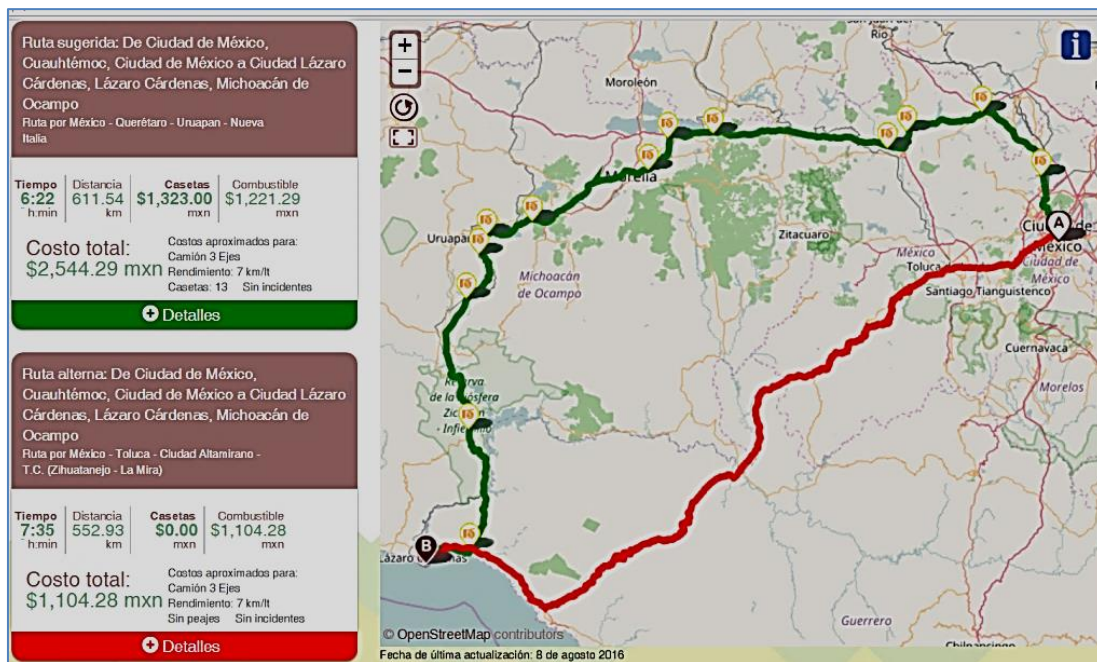


Figura 4.3. Rutas actuales para un camión C3 entre CDMX y Lázaro Cárdenas. (Fuente: MAPPPIR, disponible en: <http://tr.sct.gob.mx/mappir/>).

Para completar el análisis, en este ensayo se consideró pertinente incluir otra ruta muy conocida en la práctica: de Lázaro Cárdenas a Morelia y de ahí hacia Salamanca, pasando por Querétaro y llegando a CDMX. Los escenarios de rutas examinados fueron los siguientes:

Escenario 1: Lázaro Cárdenas-Uruapan-Morelia-CDMX. Es la ruta sugerida por el ruteo de MAPPPIR.

Escenario 2: Lázaro Cárdenas-Morelia-Salamanca-CDMX. Es la ruta añadida al análisis, dado el uso que tiene en la práctica.

Escenario 3: Lázaro Cárdenas-Las Cañas-Huetamo-CDMX. Es la primera alternativa considerada por el gobierno michoacano. Requiere de la construcción del tramo Huetamo a Las Cañas.

Escenario 4: Lázaro Cárdenas-Infiernillo-Huetamo-CDMX. Es la segunda alternativa que consideró el gobierno michoacano. Requiere la construcción del tramo Huetamo a Infiernillo.

Para los escenarios 3 y 4, se agregaron a la red carretera del modelo trazos propuestos con base en información de elevaciones del Inegi y se consideraron, además, obstáculos geográficos.



Figura 4.6. Escenario 3, L. Cárdenas–Las Cañas–Huetamo–CDMX: 553.7 km.
Fuente: elaboración propia.



Figura 4.7. Escenario 4, L. Cárdenas–Infiernillo–Huetamo–CDMX: 514.45 km.
(Fuente: elaboración propia.

Con base en las ecuaciones de costo de operación vehicular (COV), se estimó el desempeño vehicular en cada ruta para: a) tiempo de recorrido; b) velocidad promedio, y c) consumo de combustible. Los resultados se ven en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Desempeño vehicular: escenarios ZEE de Michoacán, por tiempo, velocidad y consumo de combustible

	Distancia (km)	Tiempo de recorrido (hh:mm) por tipo de vehículo						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Escenario 1	616.31	7:50	9:11	10:18	10:49	10:38	11:16	12:29
Escenario 2	689.6	8:26	9:47	11:02	11:31	11:13	11:49	13:04
Escenario 3	553.7	7:29	8:55	9:54	10:28	10:27	11:04	12:16
Escenario 4	514.45	6:58	8:19	9:15	9:49	9:49	10:25	11:34

	Distancia (km)	Velocidad promedio (km/h) por tipo de vehículo						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Escenario 1	616.31	78.7	67.1	59.8	57.0	57.9	54.7	49.3
Escenario 2	689.6	81.8	70.5	62.5	59.9	61.5	58.3	52.8
Escenario 3	553.7	74.0	62.1	55.9	53.0	53.0	50.0	45.2
Escenario 4	514.45	73.8	61.8	55.6	52.6	52.4	49.4	44.5

	Distancia (km)	Tiempo de recorrido (hh:mm) por tipo de vehículo						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Escenario 1	616.31	7:50	9:11	10:18	10:49	10:38	11:16	12:29
Escenario 2	689.6	8:26	9:47	11:02	11:31	11:13	11:49	13:04
Escenario 3	553.7	7:29	8:55	9:54	10:28	10:27	11:04	12:16
Escenario 4	514.45	6:58	8:19	9:15	9:49	9:49	10:25	11:34

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de los escenarios muestran que la ruta más corta el escenario 4, con 514.45 km, que también es la ruta con menores tiempos de recorrido para todos los tipos vehiculares.

Estos valores son consistentes, pues se observa que los tiempos de recorrido estimado aumentan mientras que la velocidad disminuye a medida que la capacidad de carga del tipo vehicular es cada vez mayor.

Para las velocidades promedio, el escenario 2 es el que tiene los valores más altos para todos los tipos vehiculares, muy probablemente porque en esa ruta se

consideran los tramos de autopistas que van de Salamanca a Ciudad de México, pasando por Querétaro, donde las velocidades de circulación son mayores.

En relación con el consumo de combustible, el escenario 4 también es el que tiene los valores más bajos para todos los tipos vehiculares. Le siguen en orden creciente de consumos los escenarios 3, 1 y 2, respectivamente.

En cuanto a los flujos vehiculares estimados, en la figura 4.8 se muestran los niveles de flujo vehicular, considerando el escenario 3 con el tramo propuesto Las Cañas–Huetamo y la información OD de carga ajustada al año 2014.



Figura 4.8. Flujos estimados. Escenario 3, con el tramo propuesto Las Cañas–Huetamo. Fuente: elaboración propia.

Análogamente, en la figura 4.9 se muestran los niveles de flujo resultantes en el escenario 4, considerando el tramo propuesto Infiernillo–Huetamo, también con la información origen-destino del año 2014.



Figura 4.9. Flujos estimados. Escenario 4, con el tramo propuesto Infiernillo–Huetamo. Fuente: elaboración propia.

Tanto en la figura 4.8 como en la 4.9, los flujos estimados no alcanzan niveles elevados, lo cual sugiere que la construcción de estos tramos no promete grandes beneficios al tráfico de carga.

4.2 Desempeño vehicular en corredores importantes

Otro ensayo útil con el modelo de flujos es la comparación antes-después de acciones de construcción o mejoramiento ya realizados en la red carretera. Esta comparación permite una evaluación amplia de los beneficios e impactos de los proyectos estudiados, indicando también las tendencias de los flujos vehiculares en la red modificada.

En este ensayo, se exploraron dos casos para la red carretera: a) la autopista Durango-Mazatlán y b) la autopista México-Tuxpan.

La autopista Durango-Mazatlán

Inaugurada en octubre de 2013, con una inversión de 28 mil millones de pesos, esta autopista incluye el célebre Puente Baluarte Bicentenario en los límites de Durango y Sinaloa, el cual tiene 1,124 metros de largo, con cuatro carriles de circulación y una altura de 402 metros sobre el río del mismo nombre (*Explorando México*, 2016).

La autopista Durango-Mazatlán se considera la más complicada que se ha construido en México, con una longitud estimada de 230 km, 115 puentes y 61 túneles en total. El beneficio estimado en tiempo de recorrido para los automóviles es una reducción de seis a dos horas y media, y para los camiones de carga de doce a seis horas (T21, 2012).

La figura 4.10 muestra la ruta en 2006 antes de la construcción de la nueva autopista, con 308.26 km. En la figura 4.11 se muestra el nuevo trazo en 2016 (en rojo), con 234.99 km.

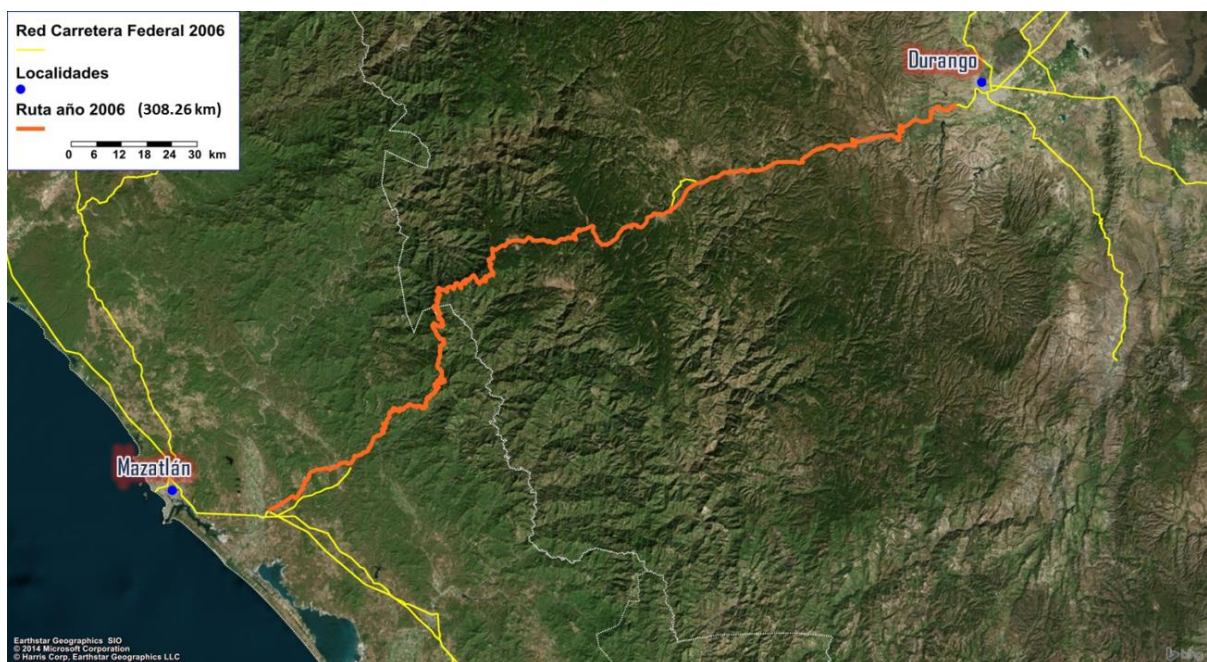


Figura 4.10. Ruta Durango–Mazatlán en 2006: 308.26 km. (*Fuente:* elaboración propia.)

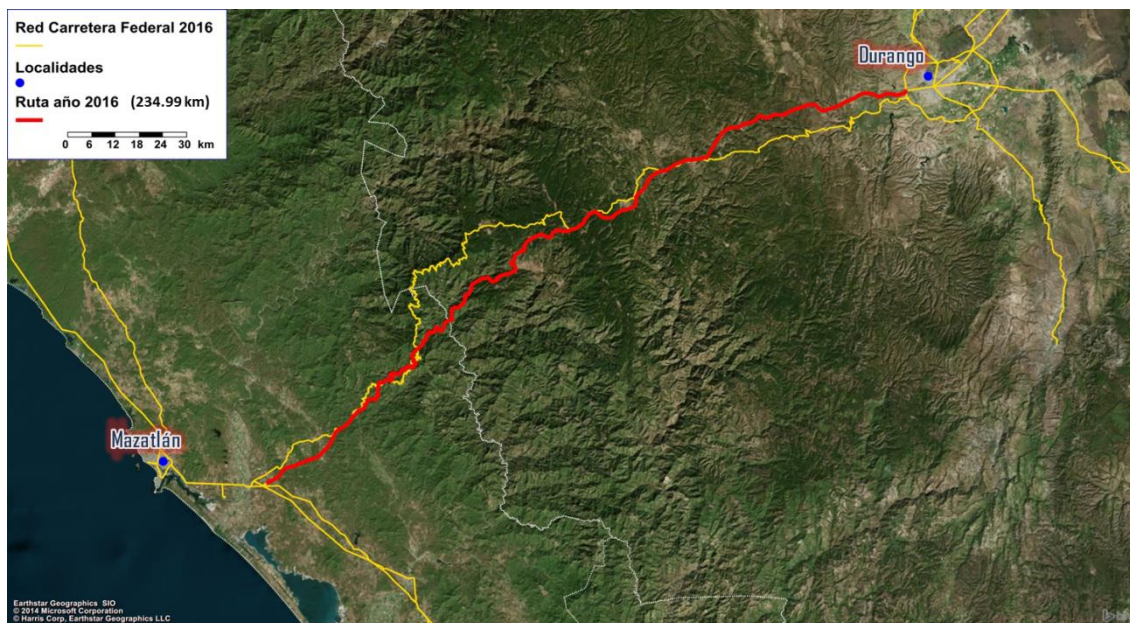


Figura 4.11. Ruta Durango–Mazatlán en 2016: 234.99 km. (Fuente: elaboración propia).

Con el método de costos de operación vehicular (VOC) referido en la sección 4.1, se estimó el desempeño vehicular para la ruta original en 2006 y para la nueva carretera en 2016. Los resultados se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Desempeño vehicular en la ruta Durango-Mazatlán, por tiempo, velocidad y consumo de combustible, antes y después de la nueva carretera

Año	Distancia (km)	Tiempo de recorrido (hh:mm) por tipo de vehículo						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2006	308.26	5:18	6:12	6:30	6:42	8:48	9:00	11:42
2016	234.99	3:06	3:42	4:06	4:18	4:06	4:18	4:48
Año	Distancia (km)	Velocidad promedio por tipo de vehículo (km/h)						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2006	308.26	58.33	49.33	47.52	45.72	35.21	34.19	26.46
2016	234.99	76.21	63.84	57.85	54.95	57.64	54.41	49.15
Año	Distancia (km)	Consumo de combustible (litros) por tipo de vehículo						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2006	308.26	54.02	179.09	172.86	286.67	285.48	373.99	547.59
2016	234.99	25.54	120.53	87.19	144.32	175.05	230.91	349.20

Fuente: elaboración propia.

El ahorro estimado en distancia es de 73.27 km. Los tiempos de recorrido estimados se reducen drásticamente, pasando de 5:18 a 3:06 horas para un automóvil (tipo vehicular “A”), y de 11:42 a 4:48 horas para un articulado T3S2R4. Los otros tipos vehiculares tienen reducciones de tiempo intermedios. Las velocidades medias tienen mejoras notables, con un máximo de 76.21 km/h para un automóvil a un mínimo de 49.15 km/h para un T3S2R4.

En términos de ahorro de combustible, la tabla 4.3 va de un mínimo de 54.02 – 25.54 = 28.48 litros para un automóvil hasta un máximo de 547.59 – 349.20 = 198.39 litros para el doble articulado T3S2R4.

Un resumen de los impactos en el desempeño vehicular con la nueva carretera, en términos de los porcentajes de mejoras, se muestra en la tabla 4.3 enseguida.

Tabla 4.3. Estimaciones de impacto en el desempeño de los tipos vehiculares: ruta Durango-Mazatlán

IMPACTOS	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Tiempo (ahorro)	41.5%	40.3%	36.9%	35.8%	53.4%	52.2%	59.0%
Veloc.media (aumento)	30.7%	29.4%	21.7%	20.2%	63.7%	59.1%	85.8%
Combustible (ahorro)	52.7%	32.7%	49.6%	49.7%	38.7%	38.3%	36.2%

Fuente: elaboración propia.

Autopista México-Tuxpan

Esta autopista se encuentra en el eje troncal estratégico que une la costa del Pacífico con la del Golfo de México, lo que ha hecho que el puerto de Tuxpan sea el más cercano a la Ciudad de México. Con una longitud estimada de 280 km, esta autopista se terminó en septiembre de 2014, con una inversión total de 8,939 millones de pesos (T21, 2014).

La autopista de cuatro carriles incluye seis túneles y diez puentes, entre los cuales destaca el Puente Gilberto Borja Navarrete, construido sobre el río San Marcos, y considerado el segundo puente más alto del mundo (Excélsior, 2014).

La reducción de tiempo estimada para un automóvil es de seis horas a sólo 2:45 h (Excélsior, 2014). Otros beneficios estimados son el impulso al parque industrial en Tulancingo, Hidalgo, y a la Terminal Intermodal Logística de Hidalgo (Zanela, L. A., 2014).

La figura 4.12 muestra el trazo de la ruta México-Tuxpan en 2006 antes de la modernización, con una longitud de 281.99 km. La figura 4.13 muestra el nuevo trazo en 2016 con 251.63 km.

Las estimaciones del desempeño vehicular comparado en las rutas en 2006 y en 2016 se muestran en la tabla 4.4.



Figura 4.12. Ruta México–Tuxpan en 2006: 327.64 km. (Fuente: elaboración propia.)



Figura 4.13. Ruta México–Tuxpan en 2016: 292.92 km. (Fuente: elaboración propia.)

Tabla 4.4. Desempeño vehicular en la ruta México–Tuxpan, por tiempo, velocidad y consumo de combustible, antes y después de la nueva carretera

Año	Distancia (km)	Tiempo de recorrido (hh:mm) por tipo de vehículo						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2006	327.64	5:20	6:12	6:28	6:38	8:52	9:02	11:43
2016	292.92	3:41	4:16	4:48	4:59	4:58	5:12	5:41
Año	Distancia (km)	Velocidad promedio por tipo de vehículo (km/h)						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2006	327.64	61.38	52.78	50.65	49.39	36.92	36.24	27.95
2016	292.92	79.70	68.61	61.11	58.82	59.00	56.38	51.58
Año	Distancia (km)	Consumo de combustible (litros) por tipo de vehículo						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2006	327.64	50.67	148.85	145.47	235.54	237.36	307.63	444.19
2016	292.92	29.40	127.11	92.15	149.99	182.01	238.69	358.16

Fuente: elaboración propia.

Las estimaciones del desempeño vehicular de la tabla 4.4 muestran claramente una mejora notable en los tiempos de recorrido, velocidades y consumos de combustible con la nueva autopista México-Tuxpan.

El mejor ahorro de tiempo es para un camión doble articulado T3S2R4, que reduce seis horas con dos minutos el recorrido y que aumenta su velocidad media un 85%, al pasar de 27.95 a 51.58 km/h. En cuanto a ahorro de combustible, el T3S2R4 también es el vehículo que muestra el mejor valor, con una reducción de $444.19 - 358.16 = 86.03$ litros de diésel.

El resumen de impactos en el desempeño vehicular en la nueva autopista se muestra en la tabla 4.5 enseguida.

Tabla 4.5. Estimaciones de impacto en el desempeño de los tipos vehiculares: ruta México-Tuxpan

IMPACTOS	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Tiempo (ahorro)	31.1%	31.2%	25.9%	24.9%	44.1%	42.5%	51.6%
Veloc.media (aumento)	29.8%	30.0%	20.7%	19.1%	59.8%	55.6%	84.5%
Combustible (ahorro)	42.0%	14.6%	36.7%	36.3%	23.3%	22.4%	19.4%

Fuente: elaboración propia.

5 Análisis de resultados

En la modelación de escenarios del capítulo 4, en el caso del tramo Aguascalientes-Guadalajara se realizó la asignación correspondiente considerando el tiempo de recorrido en la red bimodal, incluyendo efectos de congestión carretera representados por la función BPR ajustada para México. Los resultados obtenidos han sido consistentes con los valores esperados que se han publicado sobre este proyecto aún sin construirse.

En el resto de los escenarios examinados, fue posible estimar el costo de operación vehicular (COV) de los flujos resultantes del modelo de asignación, utilizando la metodología del Banco Mundial comentada en la sección 3.1.

En este capítulo se examinan estos resultados y algunas estimaciones adicionales, que permiten evaluar el desempeño vehicular para los escenarios sujetos a comparación.

5.1 Rendimientos de combustible

Uno de los resultados estimados en la comparación de escenarios del capítulo 4, fue el consumo de combustible (litros) para los tipos vehiculares considerados en el modelo de asignación. Con este dato y la estimación de la distancia recorrida (km) en cada escenario comparado, se obtiene la correspondiente estimación del rendimiento de combustible expresado en kilómetros por litro. En las tablas mostradas a continuación se examinan estos rendimientos.

Escenario de Zonas Económicas Especiales en Michoacán

En este escenario se estimaron los flujos y costos asociados para las cuatro opciones de ruta siguientes:

Escenario 1: Lázaro Cárdenas-Uruapan-Morelia-CDMX. Sugerida por MAPPIR.

Escenario 2. Lázaro Cárdenas-Morelia-Salamanca-CDMX. De uso en la práctica.

Escenario 3. Lázaro Cárdenas-Las Cañas-Huetamo-CDMX. Supone la construcción del tramo Huetamo a Las Cañas.

Escenario 4: Lázaro Cárdenas-Infiernillo-Huetamo-CDMX. Supone la construcción del tramo Huetamo a Infiernillo.

Los correspondientes valores estimados del rendimiento de combustible para los tipos vehiculares considerados se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Estimaciones del rendimiento de combustible para los tipos vehiculares en los cuatro escenarios en Michoacán

	Distancia (km)	Rendimiento de combustible (km/litro) por tipo vehicular						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Escenario 1	616.31	13.65	3.05	4.23	2.61	2.13	1.63	1.09
Escenario 2	689.6	14.35	3.36	4.64	2.89	2.36	1.81	1.22
Escenario 3	553.7	13.14	2.86	3.98	2.43	1.99	1.52	1.02
Escenario 4	514.45	13.12	2.85	3.96	2.42	1.98	1.51	1.01

Fuente: elaboración propia.

El escenario 2 es la ruta Lázaro Cárdenas-Morelia-Salamanca-CDMX, que se utiliza comúnmente en la práctica y que incluye las partes de autopista desde Salamanca hasta la Ciudad de México, donde la velocidad de circulación es mayor que en las otras rutas; esto se relaciona con la estimación más alta del rendimiento de combustible en esta ruta en comparación con las otras.

Los rendimientos de la tabla 5.1, en general, se establecen en el orden de magnitud de los rendimientos de estos tipos vehiculares, aunque para los tipos articulados pudieran estar algo bajos. Sin embargo, los valores mostrados muestran que el modelado es consistente al estimar rendimientos cada vez más bajos a medida que aumenta la capacidad de carga vehicular.

Escenario Durango-Mazatlán

En este escenario se puede observar consistentemente una notable mejora de los rendimientos de combustible para todos los tipos vehiculares para la nueva autopista, en comparación con el trazo de la vieja ruta. La tabla 5.2 muestra los rendimientos y los incrementos porcentuales para cada tipo vehicular.

Tabla 5.2. Estimaciones del rendimiento de combustible para los tipos vehiculares: ruta Durango-Mazatlán

Año	Distancia (km)	Rendimiento de combustible (km/l) por tipo de vehículo						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2006	308.26	5.71	1.72	1.78	1.08	1.08	0.82	0.56
2016	234.99	9.20	1.95	2.70	1.63	1.34	1.02	0.67
	Increment%	61.2%	13.3%	51.1%	51.4%	24.3%	23.5%	19.5%

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 5.2 se ve una mejoría importante del desempeño vehicular en la nueva carretera. Estos mejores rendimientos de combustible sin duda se relacionan con el mejor diseño de la nueva carretera, que comprende varios túneles y puentes de buenas especificaciones, que forman parte de la misma autopista. El mayor incremento porcentual en rendimiento al utilizar la nueva ruta corresponde al automóvil con un 61.2%, y el mínimo es para el articulado T3S2R4 con 19.5 por ciento.

Escenario México-Tuxpan

Las estimaciones del rendimiento de combustible comparado en las dos carreteras se muestran en la tabla 5.3. Los valores mostrados son consistentes, mostrando menores rendimientos de combustible a medida que aumenta la capacidad de carga en los camiones, y a la vez, se obtienen rendimientos mejorados en la nueva autopista.

Tabla 5.3. Estimaciones del rendimiento de combustible comparado: antes y después ruta México-Tuxpan

Año	Distancia (km)	Rendimiento de combustible (km/l) por tipo de vehículo						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2006	327.64	6.47	2.20	2.25	1.39	1.38	1.07	0.74
2016	292.92	9.96	2.30	3.18	1.95	1.61	1.23	0.82
	Incremento	54.1%	4.7%	41.1%	40.4%	16.6%	15.2%	10.9%

Fuente: elaboración propia.

Los rendimientos mejorados de la tabla 5.3 también se relacionan con el mejor diseño de la nueva carretera, así como con la disposición de túneles y puentes en la infraestructura construida, que aportan mejores especificaciones a la nueva autopista. Análogo al caso de la autopista Durango-Mazatlán, el mayor incremento porcentual en rendimiento de combustible es para el automóvil, con el 54.1% y el mínimo es para el articulado T3S2R4 con el 10.9 por ciento.

5.2 Costos de operación vehicular

Los costos de operación vehicular se estimaron para los mismos escenarios presentados en la sección anterior, con base en la metodología del HDM-VOC comentada en el capítulo 3.

Los insumos para el modelo de costos incluyeron parámetros de la infraestructura, como pendientes, curvaturas o IIR para la parte carretera, y también parámetros de los distintos tipos vehiculares utilizados en México reportados en los trabajos del VOC-MEX, una adaptación de la metodología original desarrollada en estudios previos del IMT (Arroyo, A. *et al.*, 2016).

Los costos de operación vehicular mostrados no incluyen peajes; esto con el fin de que las diferencias en costos se puedan atribuir directamente a los distintos diseños de ruta o a las mejoras de la infraestructura en la comparación de escenarios antes-después. En estos escenarios de costo tampoco se observan efectos de congestión; son más bien el caso base de costo, en condiciones semejantes a flujo libre, en los que no se compromete el nivel de servicio de los caminos.

Escenario de Zonas Económicas Especiales en Michoacán

Los costos de operación vehicular (COV) para los cuatro escenarios considerados en las Zonas Económicas Especiales en Michoacán se muestran en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Estimaciones de COV para los tipos vehiculares en los cuatro escenarios en Michoacán

Escenario	Distancia (km)	Costo de Operación Vehicular (sin peajes)						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Escenario 1	616.31	981.08	5,454.01	3,140.38	4,725.40	6,255.80	7,701.42	10,809.23
Escenario 2	689.6	1,041.29	5,640.92	3,241.12	4,813.41	6,420.18	7,847.65	10,916.37
Escenario 3	553.7	923.65	5,224.91	2,985.32	4,520.67	5,985.81	7,388.05	10,404.20
Escenario 4	514.45	860.65	4,883.28	2,785.70	4,220.66	5,593.09	6,903.86	9,722.15

Fuente: elaboración propia.

La tabla anterior muestra que el escenario 4, que corresponde a la ruta Lázaro Cárdenas-Infiernillo-Huetamo-CDMX es la de menor costo de operación, aunque esta ruta requiere la construcción del tramo Huetamo a Infiernillo.

De los escenarios de rutas que actualmente se pueden usar, el escenario 1 es el de menor costo, y corresponde a la ruta Lázaro Cárdenas-Uruapan-Morelia-CDMX, que es la que sugiere la aplicación MAPPPIR.

La diferencia en costos entre el escenario 1 (ruta sugerida por MAPPPIR) y el escenario 2, que es una ruta que se observa de uso común en la práctica (Lázaro Cárdenas-Morelia-Salamanca-CDMX), no es demasiado grande, siendo la mayor diferencia porcentual para el automóvil con 5.8% de incremento en el escenario 2, y la mínima de 1% para el articulado T3S2R4.

Escenario de la autopista Durango-Mazatlán

Los costos de operación vehicular estimados para el trazo de la antigua ruta Durango-Mazatlán y para la nueva autopista se muestran en la tabla 5.5.

Se incluyen, además, los porcentajes de ahorro obtenidos con la nueva infraestructura.

Las estimaciones de la tabla 5.5 muestran una mejoría notable en el COV para la nueva autopista. Los ahorros de COV en la nueva autopista van desde un mínimo de 36.2% para los autobuses hasta un 50.0% para los automóviles.

Tabla 5.5. Estimaciones de COV para los tipos vehiculares: ruta Durango-Mazatlán, antes y después

Año	Distancia (km)	Costo de Operación Vehicular (sin peajes)						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2006	308.26	975.73	4,172.24	3,107.59	4,889.14	5,508.05	6,853.28	9,791.26
2016	234.99	487.55	2,662.67	1,630.35	2,539.61	3,273.45	4,136.53	5,994.55
	% Ahorro	50.0%	36.2%	47.5%	48.1%	40.6%	39.6%	38.8%

Fuente: elaboración propia.

El correspondiente costo por kilómetro recorrido en las dos rutas comparadas se muestra en la tabla 5.6, donde se aprecia una mejora notable en los costos medios por kilómetro en la nueva autopista, la cual, además, es 73.27 kilómetros más corta que el trazo de la ruta original.

Tabla 5.6. Estimaciones de costo promedio por km: tipos vehiculares en la ruta Durango-Mazatlán, antes y después

Año	Distancia (km)	Costo promedio por kilómetro						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2006	308.26	\$ 3.17	\$ 13.53	\$ 10.08	\$ 15.86	\$ 17.87	\$ 22.23	\$ 31.76
2016	234.99	\$ 2.07	\$ 11.33	\$ 6.94	\$ 10.81	\$ 13.93	\$ 17.60	\$ 25.51

Fuente: elaboración propia.

Escenario de la autopista México-Tuxpan

Los costos de operación vehicular para los trazos de la ruta México-Tuxpan, antes y después de la modernización, junto con los porcentajes de ahorro en la nueva autopista, se muestran en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Estimaciones de COV para los tipos vehiculares: ruta México-Tuxpan, antes y después

Año	Distancia (km)	Costo de Operación Vehicular (sin peajes)						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2006	327.64	937.16	3,787.25	2,721.78	4,160.71	4,867.03	5,928.98	8,330.92
2016	292.92	574.36	3,027.33	1,810.54	2,766.56	3,590.22	4,463.19	6,345.10
	% ahorro	61.3%	79.9%	66.5%	66.5%	73.8%	75.3%	76.2%

Fuente: elaboración propia.

La tabla 5.7 muestra una mejora notable en los costos de operación vehicular para la nueva autopista, en comparación con la vieja infraestructura. Los porcentajes de ahorro en el COV van desde un mínimo de 61.3% para un automóvil hasta un 79.9% para un autobús, con ahorros de alrededor del 75% para los camiones articulados.

La tabla 5.8 enseguida muestra los correspondientes costos medios por kilómetro en las dos rutas comparadas.

Tabla 5.8. Estimaciones de costo promedio por km: tipos vehiculares en la ruta Durango-Mazatlán, antes y después

Año	Distancia (km)	Costo promedio por kilómetro						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2006	327.64	\$ 2.86	\$ 11.56	\$ 8.31	\$ 12.70	\$ 14.85	\$ 18.10	\$ 25.43
2016	292.92	\$ 1.96	\$ 10.33	\$ 6.18	\$ 9.44	\$ 12.26	\$ 15.24	\$ 21.66

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 5.8 se observa una mejora considerable en la nueva autopista, aunada al hecho de que se tiene un recorrido que ahorra 34.72 km en comparación con la vieja infraestructura.

6 Conclusiones y trabajo futuro

En esta segunda etapa del Modelo Nacional de Transporte se aprovechó la experiencia del prototipo construido en la primera etapa y se añadieron mejoras y datos que le dan mayores alcances a la modelación del sistema de transporte terrestre en México.

Para la representación de la red carretera, en esta etapa se utilizó la Red Nacional de Caminos (RNC), resultado del trabajo conjunto del Inegi, el IMT y la SCT. Se trata de un producto cartográfico de gran detalle de la red de caminos en México, de uso obligatorio en el sector público y de disponibilidad gratuita en los sitios web del Inegi y el IMT (IMNT, 2015).

No obstante todos los méritos y la gran calidad de detalle de la información de la RNC, la versión utilizada en el desarrollo del presente trabajo no contiene información relativa a pendientes y curvaturas medias en las carreteras nacionales, elementos indispensables para las estimaciones de los costos de operación vehicular en carreteras. Para completar esta información, en esta segunda etapa del Modelo Nacional de Transporte se agregaron valores de pendientes y curvaturas medias en la red troncal de carreteras, con base en los procedimientos descritos en el capítulo 2, además de incluirse datos de la condición de la superficie de rodamiento en términos del Índice Internacional de Rugosidad (IIR).

Con los elementos señalados integrados en la representación de red bimodal carretera-ferrocarril que utiliza el modelo, fue posible emplear el método del Banco Mundial para estimar costos de operación vehicular en carreteras, en su versión ajustada para México (VOC-MEX) –basada en el modelo HDM III–, así como estimar costos de operación vehicular en ferrocarriles con base en una referencia calculada para el año 2003 y actualizada con el Índice Nacional de Precios Productor del Inegi.

Una vez integradas estas mejoras al Modelo Nacional de Transporte, se realizaron estimaciones de impactos y desempeño vehicular en cuatro escenarios de modelación propuestos, de interés en la planeación del sector transporte en México.

Los dos primeros escenarios considerados corresponden a estimaciones de flujos vehiculares para proyectos nuevos, entre los cuales se consideraron: a) la construcción del tramo ferroviario Aguascalientes- Guadalajara, y b) rutas alternas en la Zona Económica Especial de Michoacán para un corredor CDMX-Lázaro Cárdenas.

Los dos escenarios siguientes considerados abordan estimaciones de impacto de proyectos ya terminados, y ofrecen una comparación de la situación antes del proyecto y la situación actual con el proyecto terminado. Los casos revisados fueron: a) la autopista Durango-Mazatlán, y b) la autopista México-Tuxpan.

En los cuatro escenarios considerados fue posible hacer estimaciones de los costos de operación vehicular para las clases más representativas de los flujos carreteros: automóviles, autobuses, camiones unitarios C2 y C3, y articulados T3S2, T3S3 y T3S2R4.

Además de las estimaciones de costos vehiculares comparados en los escenarios, para el tramo ferroviario Aguascalientes-Guadalajara fue posible estimar la longitud aproximada del tramo por construir y la demanda de carga potencial en dicho tramo.

En los escenarios de movimiento carretero, además de las comparaciones de costos de operación vehicular de cada tipo, se obtuvieron también estimaciones de consumo de combustible, velocidad media de circulación y tiempos de recorrido, con lo que se evalúan fácilmente los impactos y el desempeño de los distintos escenarios estudiados.

En las comparaciones de las autopistas Durango-Mazatlán y México-Tuxpan, se estima fácilmente el beneficio en distancias y tiempos ahorrados, así como el costo de operación vehicular. Lo anterior pone a discusión de modo natural el valor monetario que estos ahorros en tiempo y en distancia pueden significar para el usuario, y plantea una posible conexión con la estimación de cuotas potenciales a aplicar en los tramos mejorados, con miras a apoyar el mantenimiento y la conservación de la infraestructura.

Las consideraciones anteriores sobre beneficios y su relación con ahorros monetarios en costos sugieren como línea futura de desarrollo del modelo añadir el concepto de *valor del tiempo*, un elemento necesario para proceder a la modelación de los flujos considerando un costo generalizado que permita aplicar directamente las consecuencias económicas de la congestión en carreteras, y su relación con la problemática de reparto modal carretera-ferrocarril.

Una extensión natural del modelo actual que se busca desarrollar en líneas futuras es la estimación de una matriz OD de todas las clases vehiculares: automóviles, camiones y autobuses, con miras a alcanzar una mejor representación de la distribución de vehículos en la Red Nacional de Caminos y poder estimar niveles de servicio asociados al nivel de saturación de los arcos.

Adicionalmente, las capacidades del modelo para estimar flujos vehiculares y niveles de congestión sugieren también agregar a las líneas de trabajo futuro del Modelo Nacional la estimación de impactos ambientales (emisiones contaminantes, ruido) derivados de estos flujos, así como un análisis de escenarios diversos para estudiar acciones de mitigación de estos impactos.

Bibliografía

Archondo Callao, R.y A. Faiz (1994), “Estimating vehicle operating costs”, documento técnico número 234, Banco Mundial, Washington, D.C., disponible en: <http://siteresources.worldbank.org/EXTROADSHIGHWAYS/Resources/wbtp-234.pdf>.

Arroyo, A. *et al.* (2016), *Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2016*, publicación técnica núm. 471, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México.

Daly, A. (2000), “National Models”, *Handbook of Transport Modelling*, editado por D. A. Hensher y K. J. Button, Pergamon-Elsevier Science Ltd., Países Bajos.

Excélsior (2014), “EPN inaugura último tramo de corredor México-Tuxpan”, sección “Dinero en Imagen”, publicado el 18 de septiembre de 2014; disponible en: <http://www.dineroenimagen.com/2014-09-18/43503>.

EPL (2016), *Plano Nacional de Logística Integrada (PNLI), Empresa de Planeamiento e Logística S.A.*, disponible en: <http://www.epl.gov.br/index.php/content/view/7075.html>.

Explorando México (2016), *El Puente Baluarte Bicentenario en México*, disponible en: <http://www.explorandomexico.com.mx/about-mexico/7/424/>.

FHA (2016), *Freight Analysis Framework; Freight Management and Operations*, Federal Highway Administration [Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos], disponible en: http://www.ops.fhwa.dot.gov/freight/freight_analysis/faf/.

IMT (2015), *Red Nacional de Caminos*, . Instituto Mexicano del Transporte, disponible en: <http://www.imt.mx/micrositios/sistemas-de-informacion-geoespacial/servicios-tecnologicos/red-nacional-de-caminos/acerca-de.html>.

Inegi (2016), “Datos de relieve continental; *Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0)*”, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, disponible en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>.

Moreno, E. (1999), *Comparación de tres métodos de costeo de servicios de transporte de carga ferroviario*, publicación técnica núm. 120, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México.

Moreno, E., O. Rico, O. y A. Bustos (2014), *Funciones volumen-demora en la modelación de flujos vehiculares*, publicación técnica núm. 427, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México.

MTOP (2016), *Presentación del estudio de demanda y modelo de asignación modal de transporte interurbano de carga en Uruguay*, Ministerio de Transporte y Obras Públicas de Uruguay, disponible en: http://www.mtop.gub.uy/-/presentacion-del-estudio-de-demanda-y-modelo-de-asignacion-modal-de-transporte-interurbano-de-carga-en-uruguay?p_p_state=maximized.

NRA (2013), *National Transport Model*. National Road Authority [Autoridad Nacional de Carreteras], disponible en: <http://www.tii.ie/tii-library/strategic-planning/national-transport-model/National-Transport-Model-Brochure.pdf>.

OECD (2014), *Freight Railway Development in Mexico*, International Transportation Forum. Disponible en: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/14mexicorail.pdf>

Quintana, Martí (2014a), *Iniciarán en 2015 obras del tramo corto Aguascalientes-Guadalajara*, Revista T21, disponible en: <http://t21.com.mx/ferroviario/2014/04/29/iniciaran-2015-obras-tramo-corto-aguascalientes-guadalajara>.

Quintana, Martí (2014b), *Tramo corto Aguascalientes-Guadalajara acortará trayecto 16 horas*, Revista T21, disponible en: <http://t21.com.mx/ferroviario/2014/07/31/tramo-corto-aguascalientes-guadalajara-acortara-trayecto-16-horas>.

SE (2016), *Las Zonas Económicas Especiales de México*, Secretaría de Economía, disponible en: <https://www.gob.mx/se/articulos/las-zonas-economicas-especiales-de-mexico>.

Shiels, P. (2014), *National Transport Model: Overview and Applications*, disponible en: [http://www.tii.ie/tii-library/conference and seminar related materials/national-roads-conference/nra-national-roads-conference-2014/2.6 Philip-Shiels NRA-National-Transport-Model.pdf](http://www.tii.ie/tii-library/conference%20and%20seminar%20related%20materials/national-roads-conference/nra-national-roads-conference-2014/2.6%20Philip-Shiels%20NRA-National-Transport-Model.pdf).

T21 (2012), *Concluirá en noviembre carretera Durango-Mazatlán*, Revista T21, disponible en: <http://t21.com.mx/terrestre/2012/10/19/concluira-sct-noviembre-carretera-durango-mazatlan>.

T21 (2014), *Ponen en marcha última fase de autopista México-Tuxpan*, Revista T21, disponible en: <http://t21.com.mx/terrestre/2014/09/17/ponen-marcha-ultima-fase-autopista-mexico-tuxpan>.

Banco Mundial (2015), "Roads Software Tools; HDM-VOC", disponible en: <http://www.worldbank.org/transport/roads/tools.htm>.

Zanela, L. A. (2014), *La México-Tuxpan impulsa parque industrial en Hidalgo*, *Revista T21*, disponible en: <http://t21.com.mx/logistica/2014/06/03/mexico-tuxpan-impulsa-parque-industrial-hidalgo>.



INSTITUTO
MEXICANO DEL
TRANSPORTE



Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel. +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>