ISSN 0188-7297

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

SCT
SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

Certificación ISO 9001:2008 ǂ

REPARTO MODAL ÓPTIMO DEL TRANSPORTE TERRESTRE DE CARGA EN MÉXICO
1ª. ETAPA

Eric Moreno Quintero
Óscar Rico Galeana
Agustín Bustos Rosales
Carlos Martner Peyrelongue
Ricardo Montoya Zamora

Publicación Técnica No. 413
Sanfandila, Qro, 2014

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Reparto modal óptimo del transporte terrestre de carga en México. 1ª etapa

Publicación Técnica No. 413
Sanfandila, Qro, 2014

Este trabajo fue realizado por Eric Moreno Quintero, Óscar Rico Galeana y Agustín Bustos Rosales, investigadores de la Coordinación de Integración del Transporte del Instituto Mexicano del Transporte, con la supervisión y observaciones de Carlos Martner, Coordinador.

En la modelación, participó el Dr. Ricardo Montoya Zamora; quien desarrolló las rutinas de TransCAD y construyó el modelo con este software especializado.

Contenido

Resumen		v
Abstract		vii
Resumen	Ejecutivo	ix
Capítulo 1.	Introducción	1
.	1.1 Nota preliminar.	1
.	1.2 Antecedentes del reparto modal autotransporte-ferrocarril.	9
.	1.3 Características de los modos ferroviario y automotor. Ventajas y desventajas competitivas.	11
Capítulo 2.	El transporte terrestre de carga en México.	21
.	2.1. Participaciones modales en el movimiento terrestre de carga.	21
.	2.2. El desempeño de los modos.	23
Capítulo 3.	Conformación de la red de transporte terrestre.	31
Capítulo 4.	Un modelo para la red de transporte terrestre.	39
.	4.1. El modelo de asignación.	39
.	4.2. Supuestos y restricciones de la modelación.	45
.	4.3. La matriz origen-destino.	46
.	4.4. Cálculo del costo de operación.	49
.	4.5 El proceso de modelación.	50
	4.6 La asignación multimodal	53
Capítulo 5.	Conclusiones.	69
Bibliografía		71
Anexo A.	Homologación de los tipos de producto.	75

Resumen

Este trabajo aborda la cuestión del reparto modal óptimo entre autotransporte y ferrocarril en el transporte terrestre de carga. El tema ha sido de interés para la Dirección General de Autotransporte Federal (DGAF/SCT) y es pertinente para la planeación del sistema de transporte nacional. El interés por el transporte terrestre de carga se relaciona con la búsqueda de soluciones a los problemas de congestionamiento carretero, accidentes viales, contaminación ambiental, uso racional de combustibles y modernización del sistema de transporte.

Si bien los dos modos están desregulados; tienen ventajas y desventajas para competir o complementarse, y tienen nichos de mercado bien identificados, existe la posibilidad de transferir carga usualmente movida por carretera al ferrocarril; el cual tiene una mejor eficiencia operativa y de consumo energético. La tarea del planificador es buscar esas oportunidades de transferencia de carga, para apoyar el diseño de políticas de transporte que impulsen esos cambios. Es en esta tarea donde la modelación del sistema de transporte terrestre cobra relevancia.

Un modelo del sistema de transporte terrestre que considere los aspectos básicos del comportamiento de los modos, las redes de transporte correspondientes y sus puntos de transferencia debidamente caracterizados permite estimar los flujos de carga que podrían redistribuirse de la carretera al ferrocarril.

Partiendo de datos conocidos de los movimientos de carga carretero y ferroviario entre orígenes y destinos, se puede lograr una primera visión de las decisiones de los cargadores que realizan envíos por la red de transporte terrestre. Con base en esta información, la modelación del sistema encuentra los flujos en las redes carretera y ferroviaria que representan el menor costo de operación para los modos; un supuesto elemental de la economía del transporte.

El análisis de los flujos que resultan en escenarios distintos puede entonces dar una idea básica de las posibilidades de transferencia de carga de la carretera al ferrocarril y de ahí una primera estimación de los beneficios que pueden obtenerse.

Este trabajo desarrolla un primer modelo bimodal (carretera y F.C.) del sistema de transporte terrestre en México y ofrece una primera estimación de lo que podría ser un reparto entre carretera y ferrocarril, que mejore los movimientos de carga que se realizan usualmente. En una segunda etapa, el modelo construido será refinado e incluirá datos más recientes y con más detalle para tener mejores estimaciones, y así ofrecer un apoyo más sustentado a los desarrolladores de políticas de transporte para el sistema nacional de transporte terrestre en México.

Abstract

This paper addresses the issue of optimal modal split between truck and rail in the surface freight movement in Mexico. This topic has been of interest for the General Directorate of Road Transport (DGAF/SCT) at the Transport Ministry of Mexico, being relevant to the planning of the national transportation system. The interest on freight surface transportation is related to the search of solutions to congestion and accidents on roads, environmental pollution, rational use of fuels and the modernization of the transportation system.

Although both modes are deregulated; with advantages and disadvantages to compete, or to be complementary to each other, with markets well identified, there exists a possibility to transfer freight usually moved on trucks to the rail, having better both operational efficiency as fuel consumption. The planner's task is the search of opportunities to transfer freights in order to support the transport policy design that foster these changes. Is in this task that modelling of the transport system becomes relevant.

A model for the transportation surface system, that consider the basic issues about the modes behaviour, their corresponding networks and their transfer points properly characterized, allows to estimate freight movements able to be redistributed from the road to the rail.

Starting with known data on road and rail freight movements and their origins and destinations, a first view of the shippers' decisions moving freight on the surface network is obtained. Based on this information, the model of the system finds the flows for road and rail with the minimal operational cost for both modes, a basic assumption from transport economics.

The analysis of the resulting flows under distinct scenarios gives then a basic idea of the possibilities to transfer freight from trucks on the road to the rail system, and a first estimate of the corresponding benefits can be obtained.

This work develops a first bimodal model (road and rail) for the surface transportation system in Mexico, and offers a first estimate of possible modal split among the modes in order to improve the usual freight split observed in the practice. In a second stage, the built model will be refined including more detailed and recent data, in order to get better estimates, thus offering an informed opinion to support the transport policy design for the national surface transportation system in Mexico.

Resumen ejecutivo

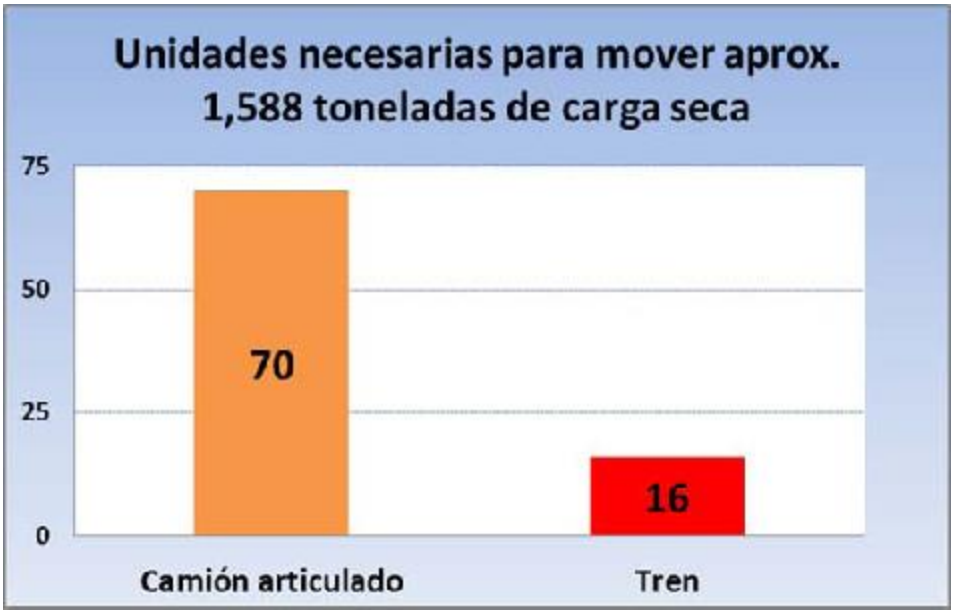
Antecedentes

El movimiento terrestre de carga se hace por dos modos principales: el carretero y el ferroviario. Las ventajas y desventajas de cada modo explican, en parte, sus participaciones en los movimientos. La cuestión de cómo son distribuidas las cargas en estos modos es de gran interés para la planeación del transporte; en relación con el uso racional de los recursos, de la infraestructura y de la energía.

El autotransporte tiene mejores tiempos de entrega, servicio puerta a puerta y gran flexibilidad para alcanzar destinos; pero tiene tarifas más altas que el ferrocarril, su eficiencia operativa y energética es menor, genera más contaminantes y suele provocar congestión en las carreteras.

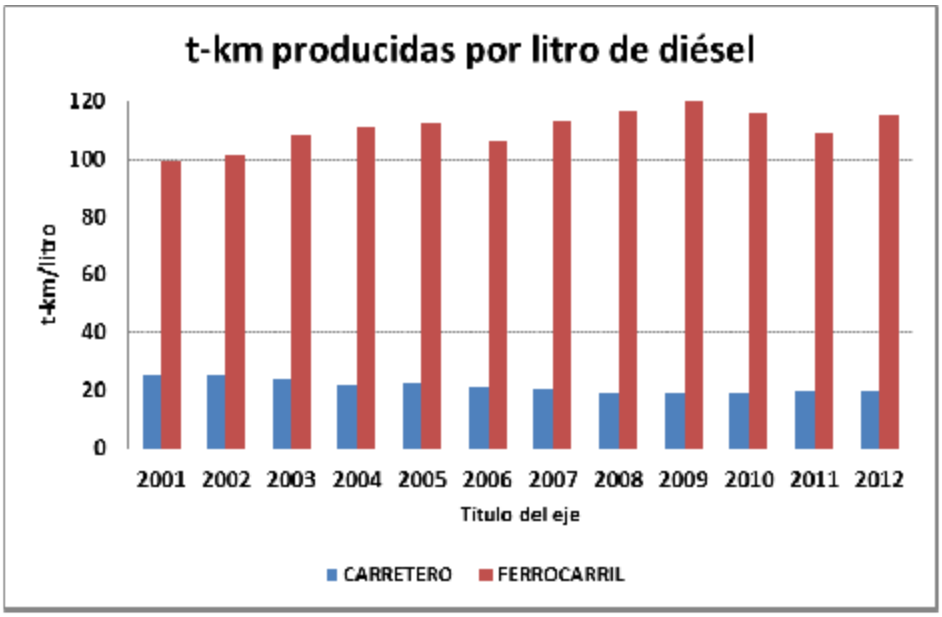
El ferrocarril tiene mayor capacidad de carga que el autotransporte, con tarifas menores, maneja economías de escala y contamina menos; pero sus tiempos de entrega son más largos, casi no tiene servicio puerta a puerta y puede tener retrasos en las entregas; lo que afecta a algunos usuarios.

Considerando la eficiencia técnica en el movimiento de carga y en el consumo de combustible, el ferrocarril tiene mejores rendimientos que el autotransporte. La siguiente gráfica muestra una comparación entre ambos modos para el movimiento de 1,588 toneladas de carga seca.



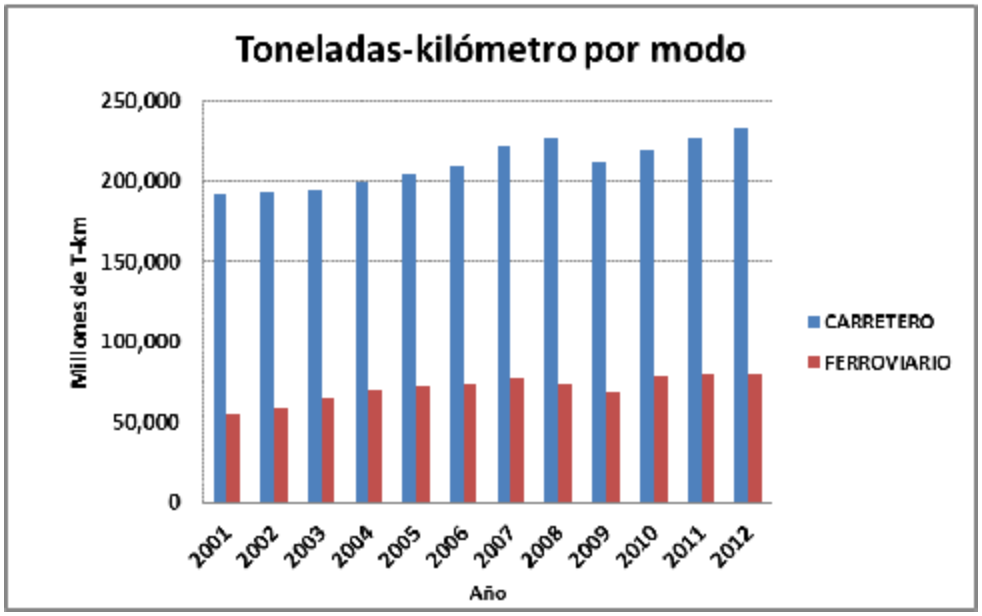
Comparaciones de capacidad (adaptado de Brogan et al, 2013)

En t-km por combustible usado, el ferrocarril tiene mejor rendimiento. La gráfica siguiente muestra el índice t-km/litro de diésel en México entre 2001 y 2012.



Eficiencia energética en t-km. Autotransporte y F.C. (con base en: IMT, Manual Estadístico 2012 2012 y Anuario Estadístico Ferroviario 2012 DGTFM).

La mejor eficiencia técnica del ferrocarril, sin embargo, no se refleja en una marcada preferencia por este modo en los flujos de carga reales. La gráfica siguiente muestra el reparto modal de t-km en México, en el periodo 2001 – 2012.



Toneladas-kilómetro del autotransporte y del ferrocarril en México. (Anuario Estadístico SCT 2012).

Los aspectos operativos de los modos es otro factor para tomar en cuenta. La tabla siguiente resume estos aspectos, para los dos modos.

Comparación de los modos domésticos de transporte en los EEUU. Fuente: Lambert y Stock (1993)

Características operativas	Autotransporte	Ferrocarril
Costo del servicio	Moderado	Bajo
Cobertura	Puerta a puerta	Terminal a terminal
Competencia interna	Alta	Moderada
Tráfico predominante	Todo tipo	Bajo y moderado valor – alta densidad
Distancia promedio	800 km	1000 km
Capacidad (toneladas)	10 – 25	50 – 12,000
Características de servicio		
Rapidez	Moderada	Baja
Disponibilidad	Alta	Moderada
Confiabilidad	Alta	Moderada
Pérdidas y daños	Bajo	Moderado – alto
Flexibilidad	Alta	Moderada

Las consideraciones anteriores plantean entonces un problema para la planeación del sistema nacional de transporte terrestre: buscar una redistribución de los flujos de carga terrestre de modo que la participación del ferrocarril aumente y mejoren los consumos de combustible y la emisión de contaminantes, a la vez que satisfagan las demandas de movilidad de las cargas.

La modelación del reparto modal

Este trabajo aborda la cuestión de la redistribución de las cargas terrestres entre el modo carretero y el ferroviario, con base en un modelo de la red de transporte terrestre que incluye ambos modos (red bimodal), y que busca las asignaciones de flujos de carga en los tramos de esta red bajo el supuesto de que se minimizan los costos totales de mover las cargas, para ambos modos.

La construcción del modelo de red bimodal fue hecho con el software TransCAD, especializado en planeación del transporte. La representación de las redes carretera y ferroviaria, con las herramientas disponibles de TransCAD, usando

datos de las carreteras federales y la infraestructura concesionada a las principales empresas ferroviarias que operan en México.

Ambas redes fueron obtenidas previamente en formato *ESRI Shapefile,* usando una proyección Cónica Conforme de Lambert (CCL) con las siguientes características:

- Esferoide: Clarke 1866
- Meridiano Central: -102°
- Latitud de referencia: 12°
- Paralelo estándar 1: 17.5°
- Paralelo estándar 2: 29.5°
- Falso Este: 2500000
- Falso Norte: 0
-

El formato ESRI Shapefile es un estándar muy utilizado en el intercambio de información entre sistemas de información geográfica. Para la proyección, se eligió la CCL, que es de uso común en representaciones del territorio a nivel nacional.

A partir de matrices OD (origen-destino), tanto de movimientos de autotransporte como de movimientos ferroviarios, en el modelo se incluyeron consideraciones sobre los tipos de carga que suelen moverse en cada uno de los modos, así como de aquellos movidos por carretera; pero que son susceptibles de viajar por ferrocarril, y aquellos que siempre se mueven por autotransporte.

Asimismo, se incluyen supuestos operativos; como las distancias mínimas aceptables para un traslado por ferrocarril, los puntos de transferencia de carga entre los modos (terminales de transferencia) y el criterio de usar las rutas que minimizan el costo total de los movimientos para ambos modos.

Para el modelado de los flujos con costos operativos, se usaron parámetros básicos para cada modo. Estos costos se diferenciaron por tipo de terreno: plano, lomerío y montaña. Así, por ejemplo (Arroyo et al, 2010) los costos de operación de un vehículo T3S3 son:

Vehículo	Plano	Lomerío	Montaña	Unidades
T3S3	16.59	20.82	25.62	$/veh-km

Para el transporte ferroviario, a partir de los costos operativos de un tren de 22 carros: 13.37, 22.62 y 33.41 USD/tren-km para terreno plano, lomerío y montaña respectivamente (Centeno A. y Mendoza, A. 2003), se actualizaron estos datos considerando que al finalizar 2010 el USD equivalía a 13.152 pesos mexicanos, obteniéndose los siguientes costos de operación:

Vehículo	Plano	Lomerío	Montaña	Unidades
FFCC	7.99	13.52	19.97	$/carro-km

Un aspecto central en la modelación de los flujos es la función de impedancia utilizada para estimar los efectos de congestión y tiempos de traslado. Para seguir con una práctica común en esta clase de desarrollos, se utilizó la función del Bureau of Public Roads norteamericano (BPR function), la cual es descrita como sigue.

$$t(x) = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x}{C}\right)^{\beta}\right]$$

donde: t_0 = tiempo de viaje a flujo libre

x = flujo en el arco

C = capacidad

α, β parámetros de calibración.

Esta función es muy usada en la modelación de redes de transporte. Una recomendación común en referencias básicas y manuales de software es emplear $\alpha = 0.15$ y $\beta = 4$; valores aplicados generalmente en modelación de redes urbanas.

Por tal razón, en este trabajo llamamos a esta particular función, *función BPR estándar*. Otros valores de los coeficientes han sido calibrados en los Estados Unidos, para autopistas (Freeways) y carreteras multicarril (Multilane), para varias velocidades de diseño. La tabla siguiente muestra estos valores.

Valores α y β para distintas vías y velocidades de diseño en los EE.UU. (NCHRP, 1998)

	Autopistas			Multi-carril		
	70 mph	60 mph	50 mph	70 mph	60 mph	50 mph
Coeficiente	113 km/h	97 km/h	81 km/h	113 km/h	97 km/h	81 km/h
α	0.88	0.83	0.56	1	0.83	0.71
β	9.8	5.5	3.6	5.4	2.7	2.1

Ya que en México las condiciones de operación promedio son menos favorables que sus correspondientes norteamericanas, en la modelación se usaron los valores de los parámetros calibrados en EEUU para caminos de menor especificación de diseño (carreteras multicarril de 60 y 50 mph).

La tabla siguiente muestra los parámetros usados en este trabajo.

Valores α y β usados en la modelación (elaboración propia)

	Autopistas		Libres de peaje	
Coeficiente	**100 km/h**	**80 km/h**	**100 km/h**	**80 km/h**
α	0.83	0.56	0.83	0.71
β	5.5	3.6	2.7	2.1

En el caso del ferrocarril, por sus condiciones de operación distintas a las del modo carretero, se utilizó la llamada asignación "todo o nada", considerando tiempo de traslado y costo medio de operación, pero sin efectos de congestión.

La siguiente tabla resume la caracterización de las variables de entrada al modelo de la red bimodal.

Variable	**Tipo de arco**		
	Carretera	**Ferrocarril**	**Conector**
Distancia	Calculada de acuerdo con la proyección	Calculada de acuerdo con la proyección	Calculada de acuerdo con la proyección
Tiempo	Calculada con velocidades promedio registradas en las carreteras	Estimada utilizando el 80% de la velocidad máxima	En el modelo de asignación inicial se estimó en 24 horas la transferencia de carretera a F.C. y 12 horas para la transferencia F.C. a carretera
Capacidad	Calculada de acuerdo con las capacidades reportadas en el manual de operación por tipo de carretera y número de carriles	No fue requerida	El número de operaciones reportadas por los centros de transferencia es variable: cajas, vehículos, toneladas, TEUs y unidades ferroviarias; además no se cuenta con información para todos los centros de transferencia por lo que se estimó la capacidad de los conectores tomando 1,800 TEU con un promedio de 6 toneladas.
Costo	Estimado con el modelo del Banco Mundial para calcular Costo de Operación Vehicular	Estimado por tipo de terreno	
Alfa	0.83 (multicarril) ó 0.71 (2 carriles)	0	0.71
Beta	2.7 (multicarril) ó 2.1 (2 carriles)	1	2.1

Los resultados de la asignación multimodal

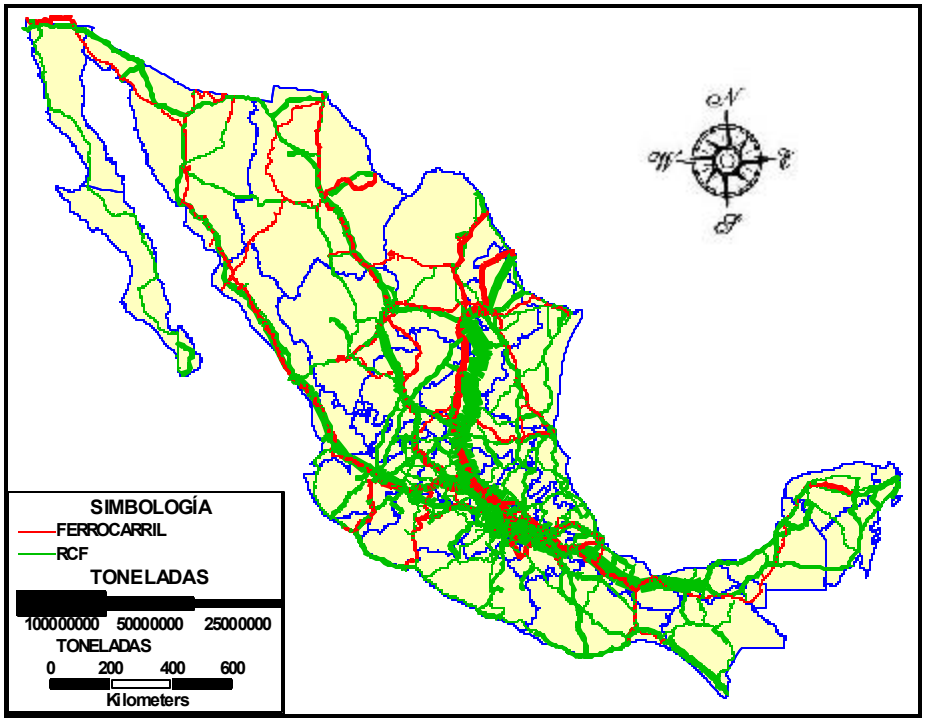
Una vez construido el modelo, se realizaron corridas de asignación de flujo de tránsito de carga considerando los ocho escenarios siguientes.

1) Asignación de toneladas de ferrocarril exclusivamente por modo ferroviario, con base en el tiempo de viaje por arco.
2) Asignación de toneladas de autotransporte exclusivamente por modo carretero, con base en tiempo de viaje por arco.
3) Asignación de toneladas de ferrocarril y autotransporte por modo ferroviario y carretero, sin intercambio de flujo de mercancías, con base en el tiempo de viaje por arco.
4) Asignación de toneladas de ferrocarril y autotransporte por modo ferroviario y carretero, con intercambio de flujo de mercancías, con base en el tiempo de viaje por arco.
5) Asignación de toneladas de ferrocarril exclusivamente por modo ferroviario, con base en el costo de operación por arco.
6) Asignación de toneladas de autotransporte exclusivamente por modo carretero, con base en el costo de operación por arco.
7) Asignación de toneladas de ferrocarril y autotransporte por modo ferroviario y carretero, sin intercambio de flujo de mercancías, con base en el costo de operación por arco.
8) Asignación de toneladas de ferrocarril y autotransporte por modo ferroviario y carretero, con intercambio de flujo de mercancías, con base en el costo de operación por arco.

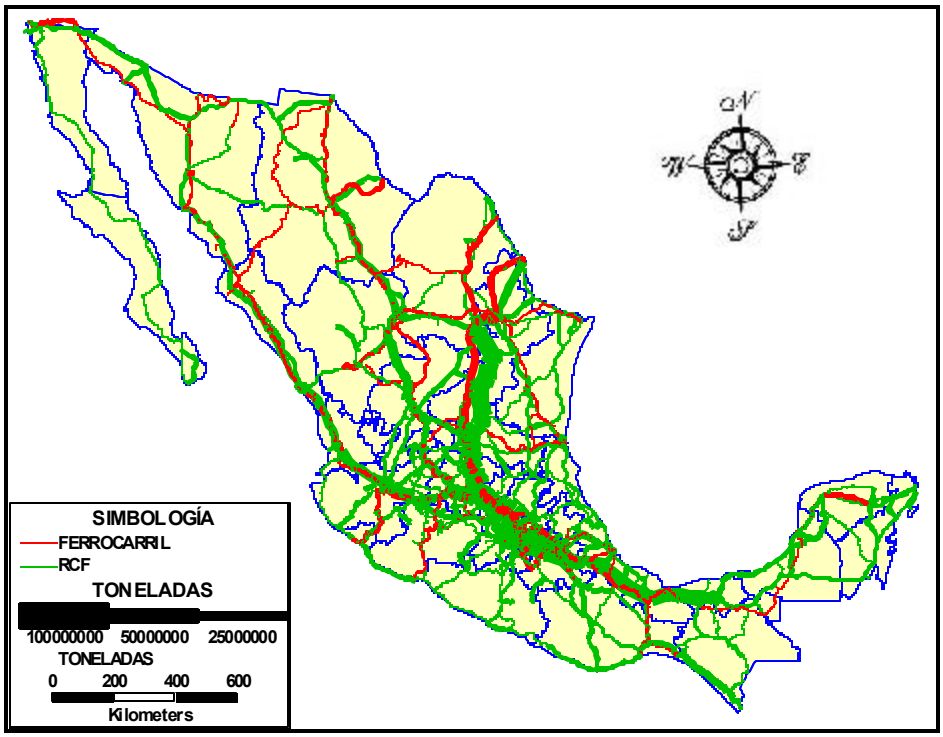
Los primeros escenarios, considerando sólo tiempo de traslado en los arcos, sirvieron para validar el modelo. Estas respuestas no pueden ser consideradas representativas del comportamiento real de los flujos, pero permitieron confirmar la lógica del modelo construido, y –naturalmente– no produjeron ninguna transferencia de cargas del autotransporte al ferrocarril, debido a que el primer modo suele tener mejores tiempos de entrega que el ferrocarril. Las dos figuras presentadas a continuación muestran las corridas de asignación con solo el tiempo de viaje en los arcos en la red bimodal.

La primera gráfica tiene el resultado sin permitir intercambio de flujo entre las redes, de forma que cada modo se maneja independientemente.

La segunda gráfica muestra el resultado que permite el intercambio de flujo entre los modos.



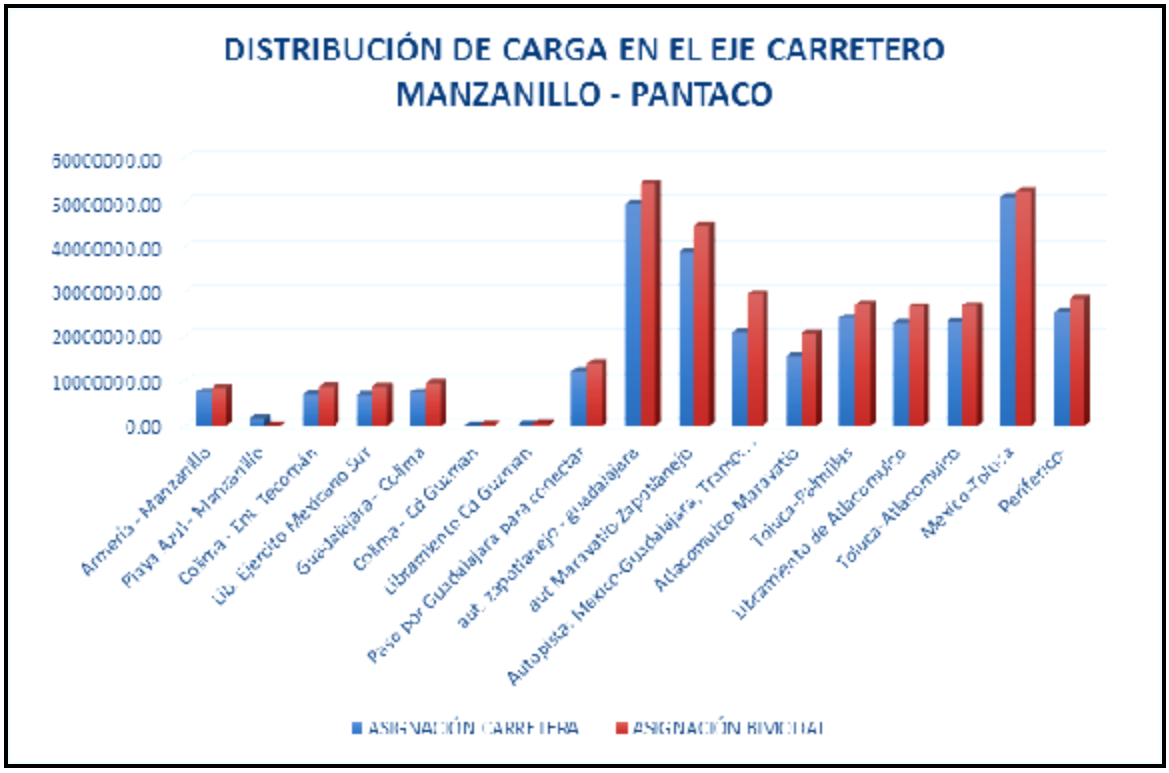
Asignación de toneladas por modo ferroviario y carretero, <u>sin intercambio</u> de flujo de mercancías, con base en el tiempo de viaje por arco. (Fuente: elaboración propia).



Asignación de toneladas por modo ferroviario y carretero, con intercambio de flujo de mercancías, con base en el tiempo de viaje por arco. (Fuente: elaboración propia).

En estas dos gráficas, el modelo mostró el comportamiento esperado; con un efecto que disminuye la carga asignada por el ferrocarril y se transfiere a los tramos carreteros.

Esto se debe a que el tiempo de recorrido en el modo carretero es menor que en el ferroviario. Sin embargo, la congestión característica de la red carretera no permite que se traslade, en su totalidad, la carga ferroviaria. Un ejemplo del efecto en el corredor Manzanillo-Pantaco aparece en la siguiente gráfica.

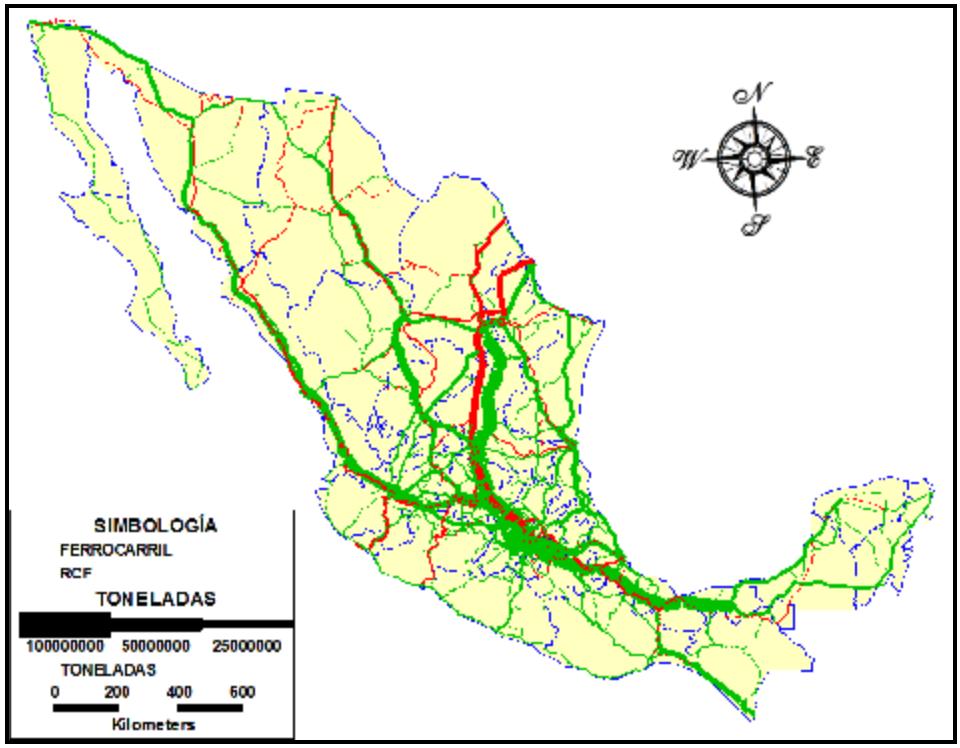


Distribución de carga (t). Eje carretero Manzanillo-Pantaco. Asignaciones con base sólo en tiempos de recorrido. (Fuente: elaboración propia).

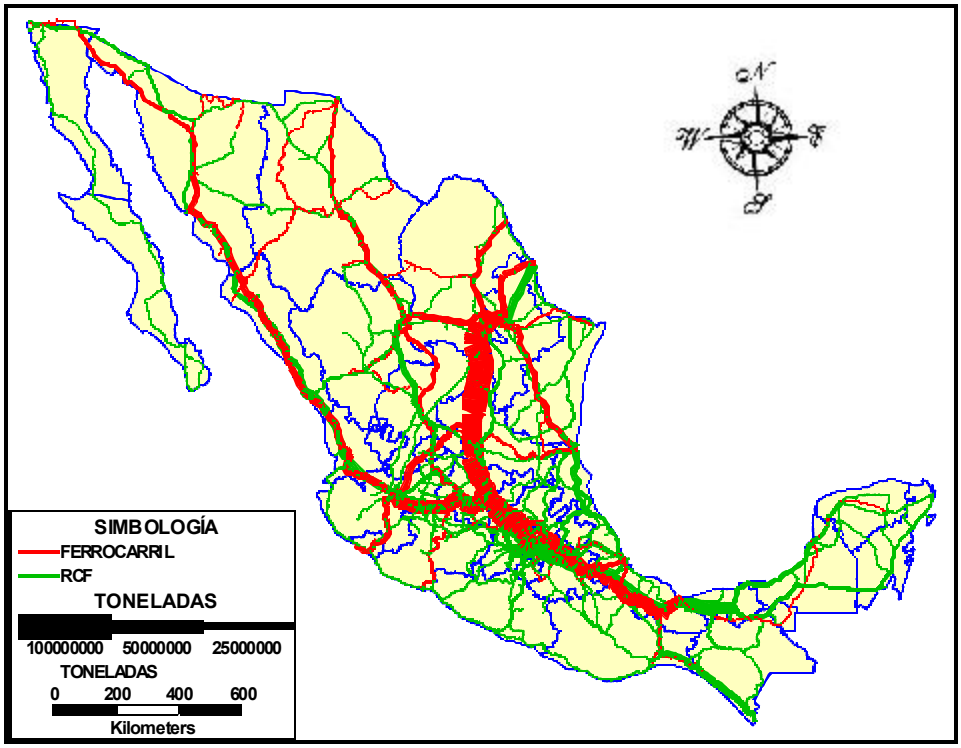
Verificada la validez del modelo con la respuesta tras considerar solo el tiempo de viaje entre orígenes y destinos, se procedió a hacer corridas incluyendo los costos de operación de los dos modos. Las dos gráficas siguientes muestran los resultados de las asignaciones en la red bimodal.

En la primera gráfica, se ve la asignación de flujos con costos operativos de los dos modos, sin permitir intercambio de cargas entre carretera y ferrocarril.

En la segunda gráfica, la asignación es también con costos operativos; y permite la transferencia de cargas entre los modos.



Asignación de carga por ambos modos, sin intercambio de flujos, con base en el costo de operación por arco. (Fuente: elaboración propia).

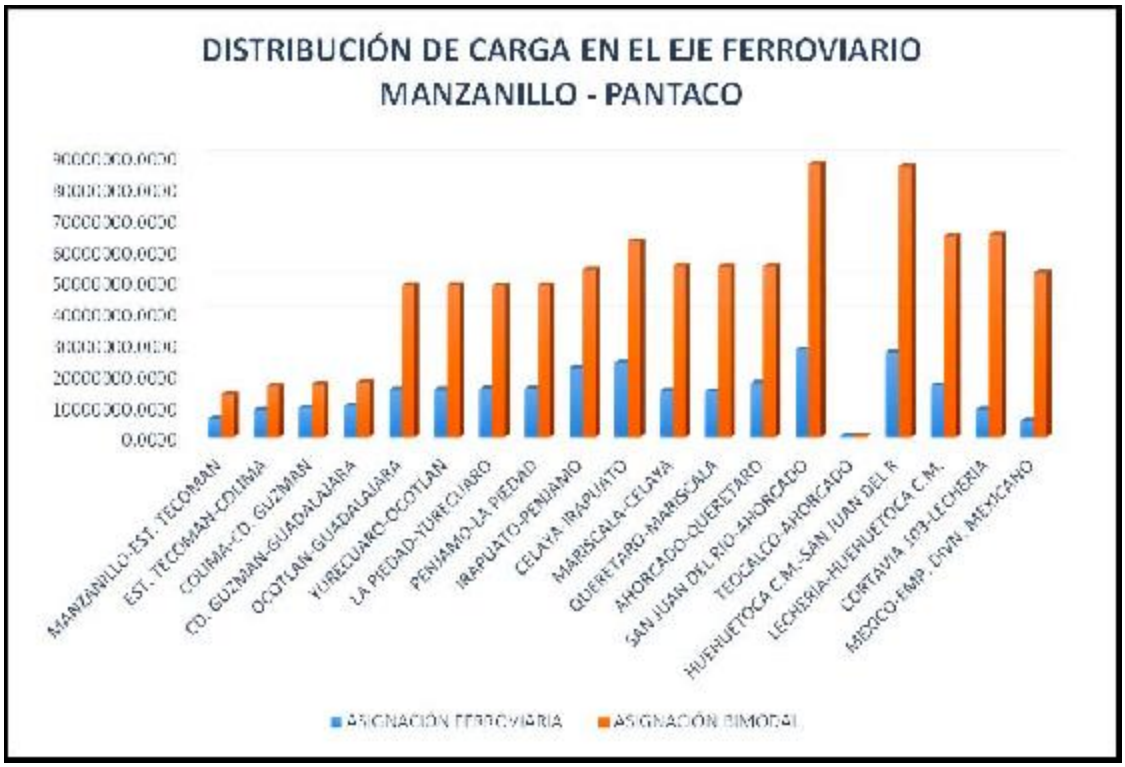


Asignación de carga por ambos modos, con intercambio de flujos, con base en el costo de operación por arco. (Fuente: elaboración propia).

Comparando las dos figuras, podemos observar un aumento de la carga ferroviaria, en contraste con el escenario sin transferencia de cargas y considerando el costo de operación para elegir la mejor ruta entre cada par OD para cada modo.

Ya que el modelo no considera congestionamiento para el modo ferroviario, la cantidad de pares OD que cambia de modo es mayor en comparación con el escenario donde el tiempo es el indicador para elegir la ruta más corta.

Los efectos de la transferencia de carga del ferrocarril a la carretera aparecen claramente en los casos de los corredores Manzanillo-Pantaco y México-Nuevo Laredo, como se puede observar en las figuras mostradas enseguida.



Gráfica representativa de la distribución de carga (t) en el eje ferroviario Manzanillo-Pantaco. (Fuente: elaboración propia).

Gráfica representativa de la distribución de carga (t) en el eje ferroviario México-Nuevo Laredo. (Fuente: elaboración propia).

Los resultados del modelo, al considerar tiempos de recorrido y costos operativos de los dos modos, parecen consistentes con la condición actual del sistema ferroviario; que compite por cargas con el autotransporte y ha mostrado una tendencia general creciente en los últimos años.

El porcentaje estimado de transferencia de carga movido por carretera y que podría ser transportado por ferrocarril es de casi 40%. Esta carga potencial requiere un tratamiento más detallado a través de un análisis de sensibilidad, que evalúe e identifique las variables que tienen mayores efectos en el modelo de asignación.

A través de la obtención de datos más precisos sobre los costos operativos de los modos, así como de otras variables que pudieren ser incorporadas al análisis –como las velocidades medias en el sistema ferroviario, o las longitudes de los trenes– se podrán mejorar las estimaciones y los pronósticos de este modelo.

Este proyecto continuará con análisis más detallados -en una segunda etapa- en la que se buscarán mejorar el modelo, así como la obtención de datos y las actualizaciones necesarias para acercarse a los años más recientes de operación del sistema de transporte terrestre.

1 Introducción

1.1 Nota preliminar

El transporte terrestre de carga tiene una relevancia económica indiscutible. El suministro de materias primas al sector industrial, el movimiento de productos intermedios a centros de procesamiento y la distribución productos terminados a centros de almacenamiento o de consumo final resultan imprescindibles para la economía nacional.

El transporte terrestre de carga que se puede contratar en México se hace totalmente por dos modos: el autotransporte y el ferrocarril. Estos modos están desregulados, con libertad de negociar tarifas con sus clientes y competir entre ellos por las cargas en los distintos mercados. Las características de cada modo: cobertura de su red, tonelajes máximos por viaje, distancias recorridas, costos operativos, emisión de contaminantes, consumos de combustible, etc. constituyen las ventajas y desventajas de cada uno, en la competencia por la carga en el país; y de ahí se deriva el reparto modal de los flujos entre autotransporte y ferrocarril.

La eficiencia del transporte de carga, por carretera o por ferrocarril -respecto a tiempos de entrega, seguridad de la carga y en particular los fletes cobrados- incide en los costos de los procesos productivos que usan el servicio, lo que incide enel precio final de los productos. Los fletes que cobran los transportistas, a su vez, dependen de sus respectivos costos operativos y de los fletes ofrecidos por los competidores. Ambos modos de transporte, de manera inevitable, generan efectos no deseados; como son las emisiones contaminantes, los accidentes, el consumo de energía, el daño a la infraestructura, el ruido, etc.; que desde el punto de vista social es deseable reducir lo más posible, sin afectar el beneficio económico asociado al servicio de transporte.

La circunstancia descrita plantea la cuestión de buscar el reparto modal del movimiento de carga que permita a cada modo (autotransporte y ferrocarril) aprovechar sus respectivas ventajas competitivas para que se logre una operación de costo mínimo a nivel nacional; con la finalidad de reducir los impactos a los precios finales de las mercancías movidas, los impactos no deseados que genera el transporte o ambas cosas.

En un enfoque de planeación, el reparto modal óptimo entre autotransporte y ferrocarril puede determinarse si se conocen las respectivas redes de transporte, sus características, los costos operativos en los tramos y la localización de los orígenes y destinos de las cargas. El problema por resolver

es la asignación óptima de los flujos en las redes, buscando minimizar el costo operativo total de los flujos de carga.

Alternativamente, otros criterios de óptimo para el reparto modal podrían ser minimizar emisiones contaminantes, minimizar los tiempos medios de entrega o algún otro aspecto de interés en la planeación del transporte terrestre.

La problemática descrita ha resultado de interés para la Dirección General de Autotransporte Federal (DGAF); la cual tiene entre sus objetivos lograr servicios de transporte carretero en condiciones de calidad y eficiencia, para contribuir a su modernización e inserción en un sistema integral de transporte nacional. Para el IMT, este trabajo fortalecerá sus experiencias en modelación de flujos en redes de transporte y actualizará sus conocimientos de las condiciones actuales del movimiento de carga en las redes carretera y ferroviaria.

Trabajos previos sobre el tema

El tratamiento del tema de reparto modal en el transporte terrestre no es del todo nuevo para el IMT; algunos estudios previos en el tema son los siguientes:

1. Rico Rodríguez, A. et al. (1995). Un Análisis de Reparto Modal de Carga entre Carretera y Ferrocarril. Publicación Técnica No. 76. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.

Ese trabajo hace un primer análisis del reparto modal entre ferrocarril y autotransporte en México, con datos del periodo 1992 – 1993. Analiza el reparto modal de algunos productos movidos por ferrocarril pero con competencia fuerte del autotransporte y productos que son adecuados para el transporte ferroviario pero sin gran participación en ese modo.

Para la estimación de reparto modal entre los dos modos, presenta un modelo Logit binario, calibrado con los datos de esos años. Al final aparecen algunas recomendaciones encaminadas a mejorar la participación del ferrocarril en el movimiento terrestre de carga.

2. Rico Rodríguez, A., Mendoza Díaz, A. y De Alba Rosano, M. (1997). Oportunidades de Intermodalismo Carretera-Ferrocarril. Publicación Técnica No. 95. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.

Este trabajo identifica 515 centroides y la carga generada en estos tanto como origen como destino (menciona que son alrededor de 20,000 pares O-D); también, 75 estaciones ferroviarias con mayor potencial de competir en captación de cargas; igualmente, determina qué mercancías se pueden transportar.

El umbral de distancia para cambiar a ferrocarril considerado es de 300 km. Asimismo, considera pares origen destino de carga para distancias mayores de

500 km. El único filtro que menciona para potencial de uso de ferrocarril es el de distancia: el texto menciona que la información referente a toneladas es usada para conocer el volumen de carga movida, pero estas no son consideradas como un factor para cambiar de modo de transporte.

Finalmente, muestra -por cada estación de encuesta- los pares origen-destino para distintos tipos de mercancía.

3. Rico Rodríguez, A., Mendoza Díaz, A., y Mayoral Grajeda, E. (1997). Identificación de las mercancías movidas por los principales corredores de transporte terrestre mexicanos. Publicación Técnica 98, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México.

En este trabajo, los autores identifican las mercancías transportadas en 1994 en los principales corredores ferroviarios (7 corredores) y carreteros (17 corredores). Las unidades de medición son toneladas por día. La lista de mercancías incluye aquellas que acumulan el 90% del total, medido en valor (US$).

La información ferroviaria proviene del reporte anual de Ferrocarriles Nacionales de México (FERRONALES); la información carretera proviene de los estudios de pesos y dimensiones realizados por el IMT para los años 1990 a 1994. Aclaran que en el segundo caso los datos provienen de una muestra, en cambio los datos ferroviarios incluyen la totalidad de los movimientos.

La clasificación de las mercancías utilizada es la del llamado Sistema de Información Comercial, de la entonces existente Secretaría de Comercio y Fomento industrial (SECOFI).

La naturaleza del reporte es esencialmente descriptiva, muestra los listados de las mercancías identificadas en cada corredor. No incluye análisis sobre la posible predominancia de algún tipo de mercancía.

4. Gil Anaya, C.Z., Reyes Ramírez, R. y Mendoza Díaz, A. (1999). Modelación Multiproducto de los Flujos de Carga en las Redes Carretera y Ferroviaria. Publicación Técnica No. 126. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.

Este trabajo fue el primer intento en el IMT de abordar el reparto modal del transporte terrestre de carga, con un modelo de flujo de redes en el cual estimaron asignaciones de flujo optimales con el criterio de costo total mínimo.

Para los cálculos de las asignaciones de flujo, utilizaron el software STAN (Strategic Transportation Analysis) de la empresa canadiense INRO; y en la modelación consideraron el flujo de varios productos, clasificados en diez grupos genéricos. Los ocho primeros para: productos forestales, agrícolas, animales y derivados, minerales, petróleo y sus derivados, inorgánicos,

industriales y otros. Los dos grupos restantes fueron: el movimiento de vehículos vacíos y la agregación de todos los tipos de productos.

Los datos de movimientos ferroviarios fueron obtenidos de los informes E-2 publicados por FERRONALES; los de movimientos carreteros, con información de la Dirección General de Autotransporte Federal (DGAF).

Para la construcción del modelo, consideraron tres modos: el flujo en carreteras libres de peaje, el flujo en carreteras de cuota y el flujo en la red ferroviaria. Para la transferencia entre modos se consideraron 70 puntos representados por estaciones ferroviarias importantes o terminales intermodales activas.

El ejercicio de modelación con datos de 1994 dio como resultado un reparto de la carga terrestre de 90% para la carretera y de 10% para el ferrocarril. Debe notarse que este año fue cuando ocurrió la privatización del sistema ferroviario. El estudio termina con algunas recomendaciones para aumentar la participación ferroviaria en el reparto modal de carga terrestre y la sugerencia de usar la metodología del estudio para estimaciones futuras.

5. Mendoza Díaz, A., Gil Anaya, C.Z. y Trejo Ramírez, J.M. (2000). Un Análisis Multiproducto a través de Redes del Transporte de Carga entre México y Estados Unidos. Publicación Técnica No. 137. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.

Este trabajo, continuación de la Publicación Técnica No. 126, usa la misma metodología para estudiar flujos de carga terrestre entre México y Estados Unidos, con datos de 1996. El modelo de asignación fue manejado también con el software STAN.

Las categorías de cargas usadas fueron nueve: las primeras siete consideraron productos forestales, agrícolas, animales y sus derivados, minerales, petróleo y sus derivados, industriales y otros; las dos categorías restantes fueron movimiento de vehículos vacíos y agregación de todos los productos.

La red terrestre considerada incluyó la red mexicana y la red norteamericana enlazada en 17 puntos fronterizos. También agregaron 70 puntos de transferencia intermodal en la representación.

Del ejercicio de asignación de flujos, encontraron que el reparto modal para los flujos entrantes (EUA a México) fue de 70.2% para el autotransporte y 29.8% para el ferrocarril; mientras que para los flujos hacia el norte (México a EUA.) el reparto fue de 84.2% y 15.8% respectivamente.

El trabajo concluye con recomendaciones para ensayar futuros modelados usando el mismo software y metodología, así como sugerencias para mejorar la participación ferroviaria en el transporte terrestre de carga.

6. Centeno Saad, A.G. y Mendoza Díaz, A. (2003). Modelo de Asignación Intermodal Multiproducto para las Operaciones de Carga por Autotransporte y Ferrocarril. Publicación Técnica No. 222. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.

Este trabajo construye un modelo de planeación para estimar el reparto modal entre ferrocarril y autotransporte, para flujos de varios productos. Con la metodología de trabajos previos, la modelación combina el software de información geográfica ArcView, de la empresa norteamericana ESRI, con las rutinas de asignación del software STAN, con información georreferenciada de las redes correspondientes.

El modelado incluyó tres propuestas de nuevas líneas ferroviarias: México-Tampico, Veracruz-Tampico y Tampico-Matamoros; para evaluar su factibilidad o rentabilidad de implementación. El criterio de optimización para el modelado fue el costo total mínimo de las operaciones, como en los estudios previos, que incluyeron criterios de capacidad limitada en los arcos y aspectos de congestión.

Generaron las matrices OD con información del Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional (EECAN) que produce anualmente el IMT, desde 1990, para los flujos carreteros y con la información de flujos ferroviarios más reciente obtenida en la Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal (DGTFM), en el año de elaboración del estudio.

Los productos considerados en la modelación se clasificaron en diez tipos: forestales, agrícolas, animales y derivados, minerales, petróleo y derivados, inorgánicos, industriales, otros y vehículos vacíos. Los datos usados para la modelación fueron de 2001.

El estudio concluye con algunas recomendaciones basadas en los resultados de la modelación; como la identificación de corredores importantes, la aproximación a las proporciones 80% □ 20% de reparto modal entre carretera y ferrocarril, y la evaluación de las nuevas líneas ferroviarias incluidas en la modelación.

7. Bustos Rosales A. et al. (2003). Análisis del Potencial para el Intermodalismo en el Movimiento de Mercancías, Proyecciones 2000, 2010, 2025. Publicación Técnica No. 235. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.

El trabajo plantea que la demanda potencial para el intermodalismo provendría del desvío de los flujos carreteros actuales. Identifica las regiones o estados con mayor oportunidad para transporte intermodal autotransporte-ferrocarril considerando el comercio binacional México-EE.UU., el comercio exterior de México por puertos y el mercado doméstico. El potencial fue determinado con criterios como la magnitud de los flujos por tipo de carga (toneladas), km

recorridos, densidad económica, grado de caducidad y accesibilidad al ferrocarril. Algunos de estos criterios son como sigue.

• Peso en toneladas de los flujos de las mercancías ≥ 70,000 ton/año.

• Distancia recorrida. Para comercio exterior por la frontera norte, consideró una distancia origen-destino de 1,100 km. Para comercio exterior a través de puertos y mercado doméstico, la distancia considerada fue de 400 km.

• Densidad económica. Para comercio exterior por la frontera norte y el mercado doméstico, consideraron flujos con densidad económica ≤ a 10 USD/kg.

• Caducidad de los productos. Para comercio exterior por la frontera norte y el mercado doméstico, utilizaron productos de baja caducidad.

• Carga movida por contenedor. Para comercio exterior por puertos, consideraron productos movidos en contenedor; sustituyendo al criterio de densidad económica y al de caducidad.

• Accesibilidad al ferrocarril. Consideraron estados de la con infraestructura ferroviaria.

Los flujos de mercancías de comercio de México fueron examinados en tres partes:

• La primera analizó flujos de mercancías entre México y EE.UU., a través de la frontera norte de México, por autotransporte.

• La segunda analizó flujos de mercancías entre el país y el resto del mundo, a través de puertos y que usan el modo carretero para la parte terrestre.

• La tercera identificó los flujos de carga doméstica con posibilidades de intermodalismo.

Con base en los criterios, caracterizaron los flujos de carga por autotransporte, eligiendo los que respetaron las restricciones establecidas, que pueden representar un mercado potencial para el transporte intermodal.

Con el mercado identificado para movimiento intermodal, proyectaron flujos potenciales para los años 2010 y 2025 en cuatro posibles escenarios, considerando el crecimiento del país con respecto a sus socios comerciales del Tratado de Libre Comercio de América del Norte y la dinámica en el peso relativo de las economías estatales. Los escenarios considerados fueron los siguientes.

• Escenario 1A. México crece más lentamente que sus socios comerciales. Sin cambio en el peso relativo de las economías estatales.

• Escenario 1B. México crece más rápidamente que sus socios comerciales. Sin cambio en el peso relativo de las economías estatales.

• Escenario 2A. México crece más lentamente que sus socios comerciales. Hay cambio en el peso relativo de las economías estatales.

• Escenario 2B. México crece más rápidamente que sus socios comerciales. Hay cambio en el peso relativo de las economías estatales.

El estudio concluye con varias estimaciones del potencial intermodal en el país. Las principales conclusiones, dadas las condiciones económicas prevalecientes en aquel año, son las siguientes.

• Los estados con potencial de intermodalismo de flujos de comercio exterior, por la frontera norte y por puertos son, en orden de magnitud de carga: (1) Distrito Federal, (2) Nuevo León, (3) Estado de México, (4) Baja California, (5) Chihuahua, (6) Tamaulipas, (7) Jalisco, (8) Coahuila, (9) Guanajuato, (10) Sonora y (11) Aguascalientes.

• Para el mercado doméstico, en el año 2000, se justifican 23 estados con potencial para instalar o ampliar terminales intermodales; los otros nueve estados: Baja California Sur, Campeche, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Quintana Roo, Tamaulipas, Colima y Tlaxcala, carecen de la carga potencial necesaria.

• Los únicos puertos de comercio exterior con potencial de intermodalismo son Veracruz y Altamira -en el Golfo de México-; y Manzanillo, en el Pacífico.

• Para el comercio exterior del año 2010, por la frontera norte, consideraron que podría agregarse Querétaro;, y para el 2025, Veracruz, Tlaxcala y Durango.

• Las proyecciones de comercio exterior por puertos, para el escenario más optimista en 2010, estimaron agregar Querétaro y Morelos. En cambio, para el año 2025, no habrá ningún otro con respecto a 2010.

• Las proyecciones de flujos totales de carga con potencial intermodal para los años 2010 y 2025 estimaron como fuente principal el comercio doméstico, con cerca del 80% de participación en 2010 y 76% en 2025.

• Para el comercio exterior por puertos, estimaron una generación de cerca del 12% del potencial en 2010 y un 11% para 2025.

• Para el comercio exterior por la frontera norte, para 2010, existe una participación cercana al 8% y aumenta para 2025 aproximadamente al 13.5%. También observaron que, en general, el escenario más favorable es el 2B, seguido del 1B. En contraste, el escenario 1A crece más limitadamente y el más bajo de todos fue el escenario 2A. Sin embargo, en forma individual, el escenario 2B muestra las dos entidades con los valores más altos de potencial (Distrito Federal y Nuevo León), para todos los escenarios considerados.

8. López Castro, M. A., Hernández García, S., y Torres Vargas, G. (2004). Evaluación económica de las actuales condiciones de competencia y complementariedad entre ferrocarril y autotransporte. Publicación Técnica 261, Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro.

Es un estudio enmarcado teóricamente dentro de las ciencias económicas, en el que analizan el desempeño del ferrocarril y el autotransporte, en el transporte de carga en México, en la década de los noventa y principios de los dos mil.

El análisis es macroeconómico y utiliza indicadores agregados; como el índice nacional de precios al productor (INPP), las toneladas y las toneladas – kilómetro, producidas por ambos modos de transporte. Las fuentes son el Banco de México y la SCT.

El análisis de la competencia se basa en la medición de la inflación en ambos modos con base en el INPP. Encontraron que, después de la privatización, el cambio de precios en el ferrocarril es mucho menor que en el autotransporte e infieren que la causa es la mayor competencia en el primero. Deducen que en el periodo analizado hay un incremento en la complementariedad entre los modos, debido al aumento en el transporte de contenedores por parte del ferrocarril.

Finalmente, ofrecen un análisis de la productividad de ambos modos utilizando análisis envolvente de datos. Concluye que el ferrocarril muestra mayor tendencia a mejorar la productividad que el autotransporte, lo cual es atribuible a su privatización.

El estudio sostiene de manera explícita que la promoción de la competencia y la privatización tienden a mejorar la productividad y la complementariedad del autotransporte y el ferrocarril.

Este trabajo examina la cuestión del reparto modal del transporte terrestre de carga con un enfoque parecido al de los trabajos previos; pero explorando las posibilidades de modelar varios criterios de optimalidad, además del de costo generalizado mínimo ya utilizado anteriormente.

Herramientas computacionales

El software de apoyo en este trabajo es TransCAD de la empresa norteamericana Caliper Corporation, un paquete con capacidades de cómputo más extendidas que las ofrecidas por STAN; y que además tiene una base de interfaz con sistemas de información geográfica que dan más flexibilidad para manejo de problemas de asignación que otros paquetes similares.

TransCad maneja archivos de sistemas de información geográfica para el modelado de problemas de transporte, y permite visualizar las redes de los sistemas estudiados así como los resultados de la modelación directamente en mapas de los sistemas de interés.

Cuenta con herramientas de análisis de problemas de transporte como ruteo, pronóstico de demanda, gestión territorial, logística, problemas de localización y diversos análisis espaciales. Su flexibilidad en la modelación permite agregar restricciones en el uso de las redes de transporte, caracterización de pasos a desnivel, vías de un solo sentido, intersecciones con atributos particulares, puntos de transferencia y reglas restrictivas como pueden ser la prohibición de usar ciertos tramos por cierto tipo de vehículos o el paso por algunos nodos, o el bloqueo de algunos tramos cuando se presentan circunstancias meteorológicas adversas, para representar mejor las necesidades operativas de los ferrocarriles.

TransCAD también permite un buen manejo de matrices de distancias o tiempos entre orígenes y destinos, así como matrices de flujos O-D requeridas para el modelado de la asignación de flujos vehiculares.

1.2 Antecedentes del reparto modal autotransporte-ferrocarril

En el siglo XIX, el transporte ferroviario fue una innovación tecnológica fundamental para el desarrollo de la revolución industrial en Europa y los Estados Unidos. La posibilidad física y económica de trasladar volúmenes masivos de materias primas permitió la expansión de la economía mundo capitalista hacia el interior de los espacios continentales y el abastecimiento de los mercados requeridos por la producción de mercancías a gran escala.

En México, el ferrocarril no acompañó a un proceso importante de industrialización de la economía. Su misión fue la de permitir la exportación de recursos minerales y forestales, abundantes en varias regiones del norte de nuestro país, hacia los Estados Unidos[1]. Por su parte, la ruta de Veracruz mejoró la tradicional, pero declinante, conexión a Europa. Se puede pensar que, al menos en cierta medida, la construcción de la red ferroviaria respondió más a un anhelo de modernidad de la clase dirigente porfiriana, que a una clara necesidad logística de la economía nacional.

En el orden social, el ferrocarril otorgó mayor movilidad a la población, aunque -naturalmente- en los corredores específicos definidos por la estructura de la red

[1] Es de llamar la atención que actualmente el ferrocarril en México transporta mucho más carga de importación que de exportación; por ejemplo, en 2012 las importaciones fueron el 80% del intercambio con el exterior (Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal, 2012)

férrea. El nuevo transporte facilitó la migración a mayor escala, especialmente después de la revolución, y con ello el crecimiento demográfico de algunas ciudades; principalmente México, Guadalajara y Puebla.

El ferrocarril fue el modo de transporte (tecnificado) dominante en nuestro país, durante casi un siglo. Sin embargo, el transporte tradicional de productos artesanales y alimentos, esencialmente de alcance local y regional, se mantuvo prácticamente sin cambios hasta el establecimiento del transporte automotor y la red federal de carreteras.

El autotransporte se convirtió en el articulador logístico de la industrialización mexicana, con base en una red radial de caminos que tuvo (tiene) a la Ciudad de México como núcleo central y las capitales regionales, como núcleos periféricos. Los corredores hacia Estados Unidos y Europa perdieron la fuerza que tuvieron con el ferrocarril. Los vehículos automotores fueron uno de los productos más exitosos de la industrialización norteamericana y europea. Gozan de grandes cualidades; destacan su bajo costo de adquisición y mantenimiento, así como su gran facilidad de adaptación a las más diversas necesidades de transporte a pequeña y mediana escala.

Sin embargo, es muy importante recalcar que su potencial pleno de transporte solo se alcanza cuando existen las redes viales imprescindibles para su circulación eficiente. La construcción y mantenimiento de las vías de autotransporte ha representado uno de los más grandes esfuerzos económicos de los Estados nacionales en el último siglo; y su extensión, cobertura y calidad son aspectos centrales en la determinación de la competitividad del transporte automotor y su costo corre -en general- por cuenta de la sociedad en su conjunto.

Otro aspecto relevante, que debe ser destacado, es que la construcción de las inmensas redes de caminos asfaltados en el siglo XX solo fue posible gracias a la abundancia de petróleo y su consecuente bajo costo. La gran disponibilidad de combustibles también permitió el crecimiento del parque de vehículos automotores hasta cifras inimaginables; tan inimaginables, como los daños que han provocado los volúmenes de emisiones contaminantes que hemos lanzado a la atmósfera en las últimas décadas.

Actualmente, en México, la preeminencia del autotransporte sobre el ferrocarril es muy grande[2]. Por diversas razones, a partir de los años treinta del siglo XX, el transporte automotor fue creciendo y dominando las actividades de transporte

[2] En 2012 el ferrocarril participa con el 18.3% de la carga transportada en el medio terrestre, medida en toneladas y con el 25.4% en toneladas – kilómetro (Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal, 2012).

terrestre de manera sistemática; mientras que el ferrocarril fue perdiendo presencia, hasta alcanzar una situación crítica a principios de los años 90[3].

A partir de esa década, luego de un radical proceso de restructuración y privatización, la participación del transporte ferroviario ha ido incrementando de manera estable, hasta alcanzar en los últimos años una calidad de oferta competitiva frente al autotransporte, que lo convierten en una opción factible y deseable.

El ferrocarril cuenta con grandes ventajas de orden técnico y económico que lo convierten en el modo de transporte de primera elección para el traslado de una gama importante de productos y una opción alternativa para muchos otros, bajo ciertas condiciones específicas que revisaremos en los siguientes apartados.

De modo muy general, en el contexto de la energía y el transporte se ha observado que:

- El siglo XX en general tuvo abundancia de energía, terrenos, recursos naturales, mano de obra y economías dominantes que impulsaron el desarrollo del transporte de carga.
- En el siglo XXI, las circunstancias son otras. La energía no renovable se reduce cada vez más, la contaminación de aire, tierra y aguas va en aumento, la congestión afecta al transporte y la competencia empresarial se da a nivel internacional debido a la globalización. La necesidad de mejorar la eficiencia en el transporte es entonces impostergable (Barkan, 2007).

1.3 Características de los modos ferroviario y automotor. Ventajas y desventajas competitivas

Las características económicas, técnicas y logísticas de los modos de transporte ferroviario y automotor han sido ampliamente estudiadas y descritas en la literatura especializada de las disciplinas científicas y tecnológicas relacionadas con el estudio del transporte.

En particular se pueden mencionar -sobre temas de economía del transporte- a Bell, Blackledge y Bowen (1983), Bell, Bowen y Fawcett (1984), Ratcliffe (1987) y Hibbs (2003); en geografía del transporte a Hoyle y Knowles (1992), y Rodrigue, Comtois y Slack (2006); en ingeniería del transporte a Khisty (1990) y Papacostas y Prevedourus (1993); y en logística a Ballou (1992) y a Lambert y Stock (1993).

[3] En 1995 el autotransporte movilizó el 92.5% de la carga terrestre (Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal, 2012).

Es importante destacar que el ferrocarril goza de una gran eficiencia tecnológica, en cuanto al esfuerzo físico necesario para desplazar carga en el medio terrestre. En terreno plano, la fuerza horizontal requerida para desplazar una tonelada de peso es de solo 1 kg para el ferrocarril; en cambio, para el autotransporte, con rodadura neumática sobre asfalto, se requiere un empuje de entre 6 y 10 kg en condiciones ideales.

La diferencia es notable y el mayor esfuerzo naturalmente implica mayor consumo energético, emisiones contaminantes y costos (Railroad Transportation Energy Efficiency, 2007). Hoyle y Knowles (1992) reportan los siguientes valores de consumo energético (Unidades Térmicas Británicas) por cada tonelada–milla transportada: aerotransporte: 14,700 – 42,000; autotransporte: 1,100 – 2,800; acuático: 680; ductos: 450; y ferrocarril: 330 – 670; los cuales son útiles para analizar las eficiencias relativas de cada modo de transporte.

Algunas razones técnicas adicionales que evidencian la mejor eficiencia del ferrocarril respecto al autotransporte son las siguientes (Barkan, 2007).

- Los ferrocarriles usan vehículos de arrastre con mayor capacidad que las cajas que mueve el autotransporte; y, además, forma trenes largos que mueven grandes cantidades de carga en un solo movimiento. Esto permite economías de escala que el autotransporte no puede obtener.
- En cuanto a capacidad vehicular, el ferrocarril tiene ventaja por el uso de equipo. Como ejemplo, la figura 1.1 muestra los requerimientos de capacidad vehicular en los dos modos para el movimiento de 1,588 toneladas de carga seca. Este movimiento implicaría aproximadamente 70 camiones articulados o un tren con 16 carros para mover la carga.

Figura 1.1 Comparaciones de capacidad (adaptado de Brogan et al, 2013)

- Adicionalmente, la facilidad del ferrocarril de mover varios carros acoplados hace que su costo de operación sea menor que el del autotransporte. Una tripulación de dos operadores puede conducir un tren que lleva de 100 a 150 carros, además de que el espaciamiento de estos al formarse permiten mayores reducciones a la resistencia aerodinámica en comparación con el movimiento del autotransporte; este efecto ya es relevante para velocidades mayores a 60 km/h; la Figura 1.2 ilustra esta característica.

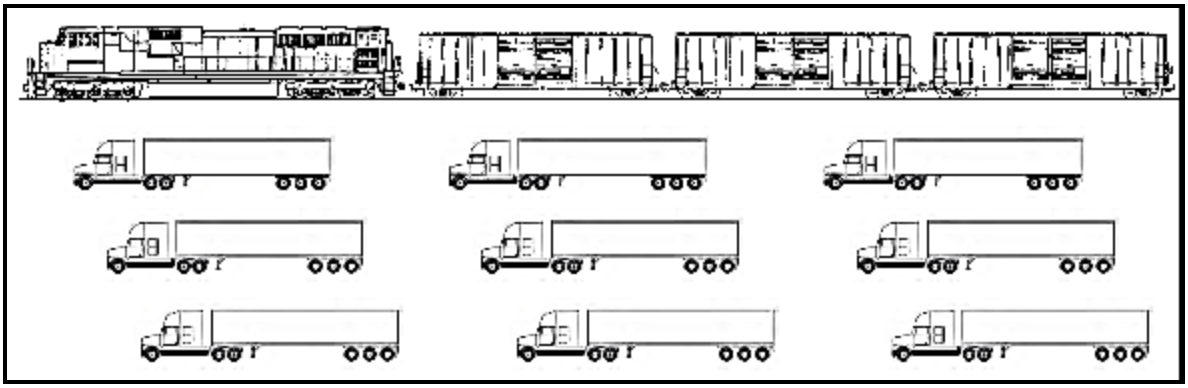


Figura 1.2 Ventaja del ferrocarril frente a la resistencia aerodinámica en el movimiento. (adaptado de Barkan, 2007)

Las características empresariales de los modos

Una de las grandes ventajas del autotransporte es el bajo costo de adquisición y mantenimiento de los vehículos e instalaciones, que permiten a corporaciones pequeñas -e incluso a personas físicas- acceder a la producción del servicio. Sin la carga de los costos fijos, el costo promedio de producción es cercano al costo marginal aún para volúmenes relativamente pequeños de producción, lo cual otorga competitividad y representa una clara ventaja comparativa frente a otros modos de transporte. Tal ventaja es fuertemente reforzada por el hecho de que en las sociedades actuales los productores de autotransporte no enfrentan directamente los costos de construcción y mantenimiento de la infraestructura vial, sino a través de impuestos indirectos, junto con grandes grupos de la población.

Adicionalmente, el autotransporte es uno de los servicios públicos de transporte menos regulados económicamente; de tal suerte que la facilidad de entrada al mercado es muy grande para los prestadores del servicio. Lo anterior es especialmente válido para el segmento de la industria en el que se desempeñan las pequeñas empresas y los hombres-camión. Por el número de oferentes, la flexibilidad para la fijación del precio y la poca diferenciación del producto; dicho segmento es el que más se aproxima a las condiciones de mercado en competencia perfecta, de entre todos los mercados de transporte.

La situación cambia paulatinamente, conforme crece el tamaño de las organizaciones económicas participantes; pues las grandes corporaciones de autotransporte muestran costos fijos más altos y las economías de escala consecuentes les obligan a mantener volúmenes de producción suficientes para lograr un costo de producción competitivo.

Evidentemente, una mayor escala no solo representa dificultades; sino que también otorga una importante diversidad de ventajas frente a los pequeños productores, pues existen ventajas competitivas; por ejemplo, por la adquisición de insumos a gran escala, créditos y financiamientos, e incluso por una mucho mayor habilidad comercial y administrativa.

Las características económicas del ferrocarril son muy distintas a las del autotransporte. Las dificultades para ingresar a la actividad son enormes, en lo económico, técnico, administrativo, comercial e incluso en el aspecto regulatorio. Lo que compensa es que, una vez adentro, se enfrenta poca competencia por parte de otras empresas ferroviarias; con las ventajas que ello implica en términos de negociación de precios y servicios con los clientes y el organismo regulador.

Los costos de adquisición y mantenimiento de la infraestructura y el equipo ferroviario son muy significativos; por ello, la producción de los servicios muestra importantes economías de escala. La diferencia entre el costo promedio y el costo marginal de producción puede ser muy alta, lo cual representa un gran reto comercial para las empresas, pues es claro que el ferrocarril requiere de cuantiosas cantidades de carga para operar en un rango competitivo.

Tales volúmenes difícilmente son aportados por un solo cliente, esto obliga a que los trenes sean formados con diversos embarques con diferentes orígenes y destinos, lo cual requiere de mayores habilidades de gestión y complicados procesos de consolidación de trenes en los patios, y hace que los tiempos de entrega normalmente sean mayores que en el autotransporte.

Vocaciones de transporte por tipo de carga, distancia, volúmenes.

Las diferencias técnicas y económicas entre el autotransporte y el ferrocarril son tan considerables, que en principio no lucen como modos de transporte substitutos que compitan en un mismo mercado; sino que se esperaría que la relación comercial y operativa entre ellos fuera la que se presenta normalmente entre servicios complementarios.

Sin embargo, en la práctica mexicana se observa que el autotransporte atiende, además de la gran variedad de segmentos de mercado en los que sus ventajas son incontrovertibles, mercados que parecen más adecuados para el ferrocarril. El resultado es que la participación del autotransporte en la distribución modal de la carga es abrumadora; con las conocidas consecuencias en términos de afectación a la comodidad, seguridad, costo, ambiente, etc.

Para definir los espacios con ventajas operativas para cada una de las dos modalidades de transporte, se puede comenzar analizando tres variables fundamentales que afectan al costo de transporte por tonelada - kilómetro: distancia, volumen de carga y tipo de carga.

En una segunda etapa, la discusión debe ser ampliada considerando adicionalmente variables de tipo logístico como frecuencia de embarque, tiempo de entrega, confiabilidad, seguridad, flexibilidad, etcétera, debido a que éstas resultan determinantes en la elección de un modo de transporte por parte de los embarcadores.

Considerando que en los Estados Unidos el transporte ferroviario mantiene una posición estable dentro del mercado de servicios de carga desde hace décadas y que sus condiciones económico – geográficas tienen suficientes paralelismos con nuestro país, sus características del servicio pueden servir como una referencia de comparación útil para analizar la potencialidad del caso mexicano en el mediano plazo.

Lambert y Stock (1993) afirman que en los EE.UU. el ferrocarril solo compite con el autotransporte en el segmento de carro completo (Truck Load – TL)[4] y en distancias mayores a los 800 km (500 millas). En cuanto al tipo de carga, los autores señalan que mientras que el autotransporte es capaz de transportar prácticamente cualquier carga, el ferrocarril solo es competitivo para productos de bajo y moderado valor y alta densidad física.

La tabla 1.1 muestra una lista comparativa de características de ambas modalidades que fue publicada en 1993 por los citados Lambert y Stock.

En general, en nuestra opinión, las características reportadas para los dos modos de transporte en los EE.UU. son bastante similares con respecto al caso mexicano.

Sin embargo, es muy notable que la capacidad máxima atribuida al autotransporte sea de solo 25 toneladas, pues en México la capacidad máxima con que opera el autotransporte es mucho mayor y una reducción de esa magnitud necesariamente implicaría un mayor número de viajes, más alto costo de producción y posiblemente la derivación de parte de la carga al ferrocarril.

[4] El autotransporte ofrece las dos categorías de servicio conocidas como de menos de carro entero (LTL) y la más tradicional de carro entero (TL). La diferencia entre los dos va más allá de la simple utilización del espacio de las cajas, pues el servicio LTL suele implicar la consolidación de varios embarques en una sola caja y la necesidad de tener terminales con infraestructura y organización similar a la de los servicios de paquetería.

Tabla 1.1. Comparación de los modos domésticos de transporte en los EEUU. Fuente: Lambert y Stock (1993)

Características operativas	Autotransporte	Ferrocarril
Costo del servicio	Moderado	Bajo
Cobertura	Puerta a puerta	Terminal a terminal
Competencia interna	Alta	Moderada
Tráfico predominante	Todo tipo	Bajo y moderado valor – alta densidad
Distancia promedio	800 km	1000 km
Capacidad (toneladas)	10 – 25	50 – 12,000
Características de servicio		
Rapidez	Moderada	Baja
Disponibilidad	Alta	Moderada
Confiabilidad	Alta	Moderada
Pérdidas y daños	Bajo	Moderado – alto
Flexibilidad	Alta	Moderada

También es razonable pensar que las distancias medias de recorrido reportadas, así como la distancia mínima de competitividad del ferrocarril frente al autotransporte, sean mayores en los EE.UU., considerando que su territorio continental es casi cinco veces mayor que el de México en superficie[5]. Así, por ejemplo, Hoyle y Knowles (1992) reportan que en el Reino Unido, con una superficie menor a la de México, la distancia de competitividad del autotransporte es de 300 a 400 km.

En cuanto a la variable tiempo, Ronald Ballou -en su conocido libro de logística (Ballou, 1992)- discute los resultados de un estudio efectuado por James Piercy para su investigación doctoral en la Case Western Reserve University en el que recopiló 16,000 datos sobre el tiempo de viaje en diversos modos de transporte en los EE.UU. a finales de la década de los setenta.

De dicho estudio presentamos los datos (ver Tabla 1.2) que corresponden al ferrocarril y al autotransporte de carro completo (TL); considerando que, aunque relativamente antiguos y con origen en otro país, pueden servir como una

[5] En México, los valores medios de recorrido reportados por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT, 2012) son de 469 Km para el autotransporte y de 742 Km para el ferrocarril.

referencia interesante para analizar las características comparativas de ambos modos de transporte.

En la tabla 1.2 se puede observar que los tiempos de entrega del ferrocarril son mayores que los correspondientes del autotransporte, es decir tiene una velocidad comercial menor.

Adicionalmente, conviene destacar que los datos del ferrocarril muestran una mayor variabilidad, en algunos casos enorme, como en el intervalo de las 2,000 millas; en el que el rango es de 20 días. La mayor variabilidad demuestra que la confiabilidad del ferrocarril era menor que la del autotransporte cuando fue hecho el estudio.

Tabla 1.2. Tiempo de viaje en días en autotransporte y ferrocarril para diferentes distancias. (Nota: los valores mínimo y máximo corresponden al intervalo con el 95% de los datos. Fuente: Ballou, 1992)

Distancia de viaje (millas)	Ferrocarril			Autotransporte en carro completo		
	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo
0 – 49	1.5	0	3.5	0.8	0	3.2
100 – 199	5.2	0	11.9	2	0	5.6
300 – 399	8.3	1.4	15.2	1.9	0	4.7
500 – 599	9.8	2.5	17.1	2.7	0	6.4
700 – 799	8.6	0.6	16.6	4.1	0	8.9
1000 – 1099	12.2	2.9	21.5	4	1.1	6.9
1500 – 1599	11.1	5.6	16.6	5.3	0.8	9.9
2000 – 2099	11.5	1.4	21.5	8	0	16.1
2500 – 2599	12.4	8.3	16.6	8.8	3.3	14.3
3000 – 3099	10.6	1.5	19.7	10.4	5.9	14.9

Para ayudar en el análisis, a partir de los datos de la tabla 1. 2 (Ballou, 1992), se elaboró la gráfica de la figura 1.3. La distancia aquí se expresa en kilómetros y se usaron los valores promedio para los tiempos de entrega.

La gráfica muestra que los tiempos de entrega del autotransporte son menores que los del ferrocarril, para todas las distancias recopiladas. Sin embargo, es importante señalar que el comportamiento cambia con la distancia, pues hasta un valor cercano a los 2,000 km la diferencia es creciente y a partir de dicho valor la

diferencia es decreciente hasta que los valores son prácticamente iguales para un valor cercano a los 5,000 km.

Lo anterior significa que la competitividad del autotransporte es creciente hasta cierta distancia; y que a partir de ese punto comienza a disminuir hasta prácticamente igualarse con la del ferrocarril.

También es interesante notar que el comportamiento de las curvas muestra distintas relaciones; pues la que corresponde al autotransporte tiene una fuerte tendencia lineal, que se corrobora al calcular el coeficiente de correlación lineal entre el tiempo de entrega y la distancia recorrida, que para el autotransporte tiene un valor de 0.991 y para el ferrocarril de 0.704.

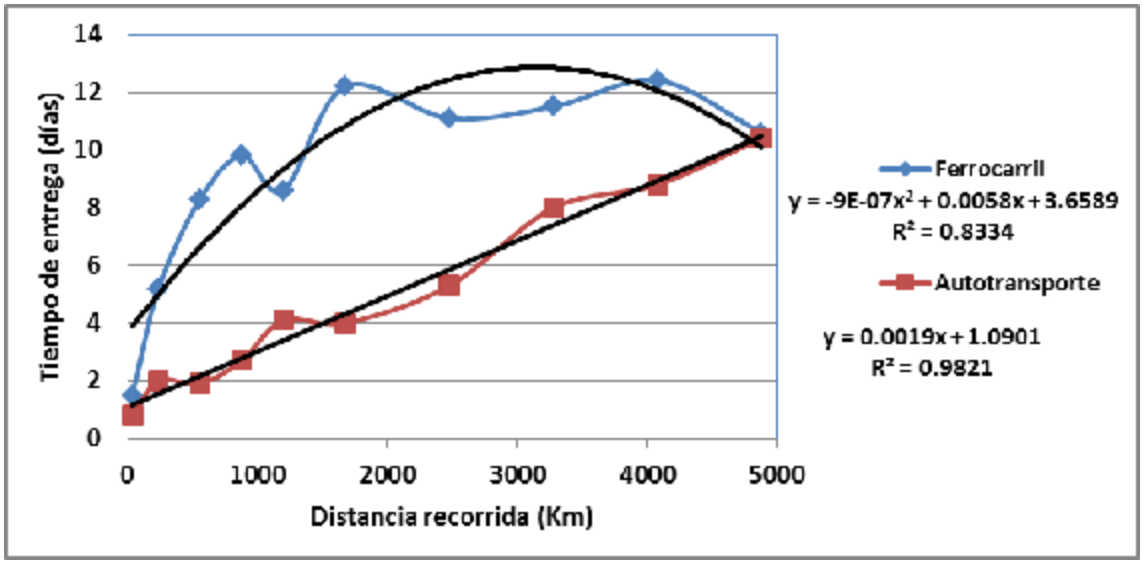


Figura 1.3. Tiempo de entrega en función de la distancia recorrida en autotransporte y ferrocarril. Fuente: elaboración propia con datos de Ballou (1992) y la Tabla 1.2.

La regresión lineal entre el tiempo de entrega por autotransporte y la distancia recorrida tiene un alto desempeño estadístico, con un coeficiente de determinación de 0.982 y altas probabilidades de significancia para los dos parámetros. La ordenada al origen tiene el valor de 1.09 y la pendiente de 0.0019, las unidades son días y días por kilómetro, respectivamente.

La ordenada al origen representa el tiempo promedio de procesamiento que toma cualquier embarque y que en este caso es ligeramente superior a un día. La pendiente indica el tiempo promedio que toma recorrer cada kilómetro. Convirtiendo los días a horas y calculando el recíproco, se obtiene una velocidad promedio de 21.68 kilómetros por hora, que representa la velocidad comercial para el autotransporte.

Para el caso del ferrocarril, debido a la forma de la dispersión de los datos, se obtiene un mejor ajuste mediante una función cuadrática del tipo:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$$

La regresión cuadrática calculada tiene un alto desempeño estadístico, con un coeficiente de regresión múltiple de 0.912; un coeficiente de determinación de 0.833 y altas probabilidades de significancia para los tres parámetros.

Los valores obtenidos para los parámetros son 3.658 para la ordenada al origen, 0.0058 para el primer coeficiente y -9.27E-07, para el segundo.

En el caso del ferrocarril, se puede observar que la inclinación de la curva es variable en función de la distancia y que la pendiente es mayor para los primeros 2,000 km. Dado que la velocidad es una función del recíproco de la pendiente, resulta que la velocidad promedio también varía en función de la distancia recorrida y es mucho menor en el intervalo inferior a los 2,000 km.

La velocidad comercial calculada para el ferrocarril es de 7.5 Km/h -para distancias menores a 2,000 km- y aumenta paulatinamente hasta igualar la del autotransporte (21 km/h) cerca de los 5,000 km.

Es conveniente señalar que la ordenada al origen en ambas curvas (1.09 y 3.65 días) representa el tiempo promedio requerido para realizar diversas actividades adicionales durante todo el proceso de transporte, y que no necesariamente representa únicamente el tiempo de respuesta al inicio del proceso.

2 El transporte terrestre de carga en México

El transporte comercial de carga, por tierra, ocurre principalmente por el modo carretero y por el modo ferroviario. Las participaciones de cada uno son distintas y, en general, se ha observado -por un buen tiempo- una dominancia del modo carretero sobre el modo ferroviario.

2.1 Participaciones modales en el movimiento terrestre de carga

El reparto modal del movimiento de carga terrestre ha estado dominado por el modo carretero, por varios años; aún después de la privatización del servicio ferroviario en 1997. Las figuras 2.1 y 2.2 muestran las toneladas movidas y las toneladas-kilómetro por modo en el periodo 2001 – 2012 en México.

Las distancias medias recorridas por cada modo se muestran en la figura 2.3.

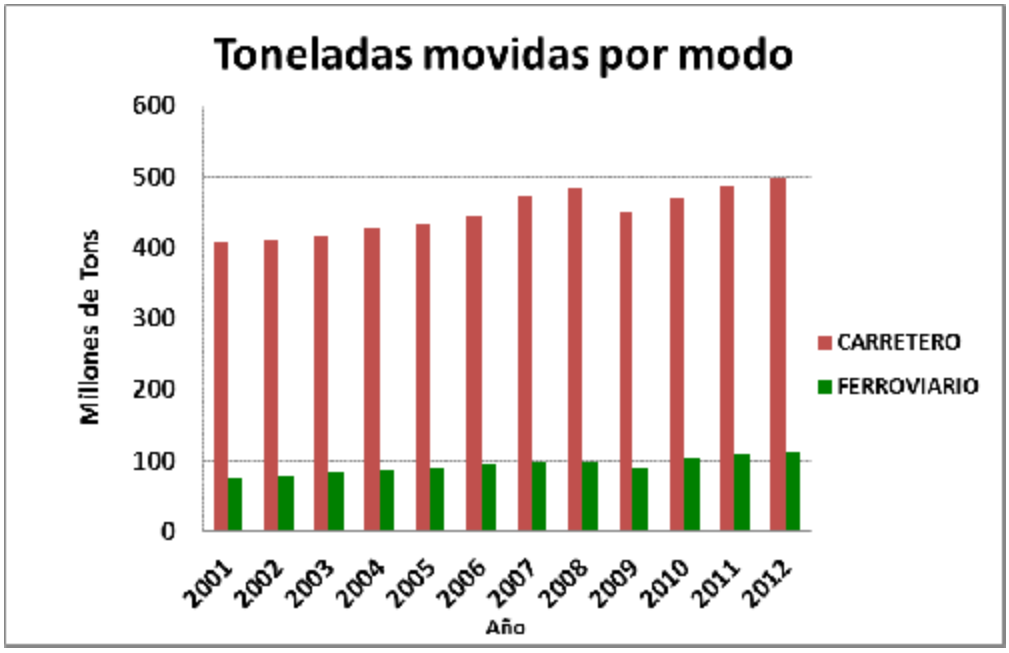


Figura 2.1. Toneladas movidas por carretera y por ferrocarril en México. (Anuario Estadístico SCT 2012).

Las figuras 2.1 y 2.2 muestran la dominancia del autotransporte en el servicio de carga terrestre. Al ser mayor la generación de t-km en el autotransporte, y a la vez menor sus distancias medias de recorrido comparadas con las del ferrocarril, es

de esperar que el número de viajes del autotransporte sea mucho mayor que el del ferrocarril; y por tanto, que su consumo energético sea también mayor.

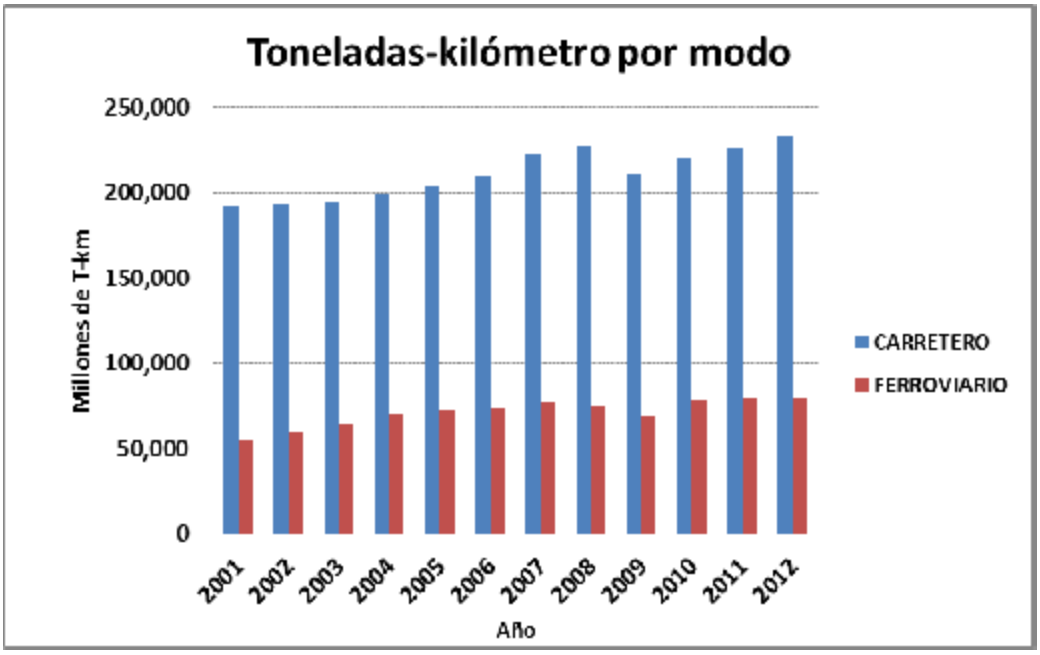


Figura 2.2. Toneladas-kilómetro del autotransporte y del ferrocarril en México. (Anuario Estadístico SCT 2012).

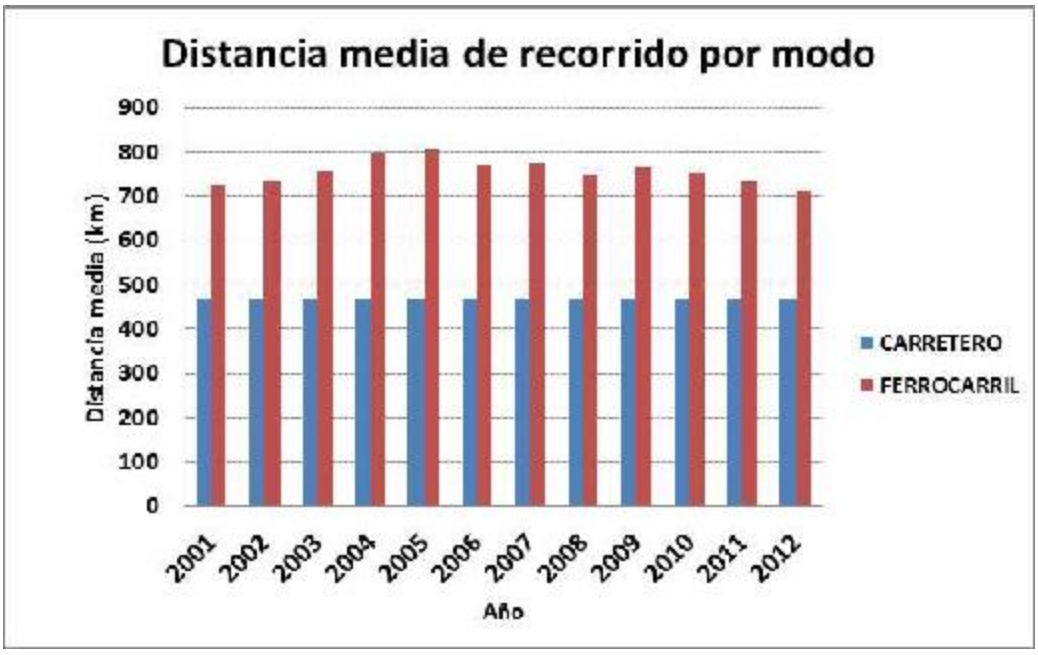


Figura 2.3. Distancias medias (km). Autotransporte y ferrocarril en México (Fuente: IMT, Manual Estadístico 2012).

Las participaciones porcentuales del autotransporte y del ferrocarril -tanto en toneladas como en toneladas-kilómetro- aparecen en la tabla 2.1, para el periodo 2001 – 2012.

Tabla 2.1. Reparto modal de carga carretera-FF.CC. (con base en el Anuario Estadístico SCT 2012).

Reparto modal	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Tons carretera	83.3%	83.6%	83.0%	82.9%	82.9%	82.3%	82.6%	82.9%	83.3%	85.6%	85.9%	86.3%
Tons FFCC	15.7%	16.4%	17.0%	17.1%	17.1%	17.7%	17.4%	17.1%	16.7%	14.4%	14.1%	13.7%
tkm carretera	77.7%	76.5%	75.2%	74.1%	73.9%	74.0%	74.2%	75.3%	75.4%	73.7%	74.0%	74.6%
tkm FFCC	22.3%	23.5%	24.8%	25.9%	26.1%	26.0%	25.8%	24.7%	24.6%	26.3%	26.0%	25.4%

La tabla anterior muestra un ligero aumento en la participación del transporte carretero, en el movimiento de toneladas -entre 2006 y 2012- con la consecuente disminución para el ferrocarril. En cuanto a la producción de toneladas-kilómetro, el autotransporte ha oscilado entre el 74% y el 75%, en el mismo periodo; lo que muestra cierta estabilidad. Los valores promedio de porcentajes de reparto carretera-ferrocarril que resultan de la Tabla 2.1 son: 84% – 16% para toneladas movidas y 75% – 25% para las toneladas-kilómetro en el periodo 2001 – 2012.

2.2 El desempeño de los modos

Al producir el servicio de transporte de carga; tanto el autotransporte como el ferrocarril están sujetos a las restricciones de la tecnología que emplean, la infraestructura que utilizan y sus formas de organización empresarial. Estas restricciones caracterizan sus habilidades para generar el servicio y determinan su desempeño como empresas de transporte de carga. Este desempeño puede describirse por dos aspectos básicos que se examinan enseguida: a) la estructura de costos y b) el consumo energético.

La estructura de costos

La composición porcentual de los costos en que incurren tanto autotransportistas como ferroviarios, para generar su servicio, es un factor por considerar en la discusión del reparto modal de la carga.

Si bien es muy difícil obtener directamente de los transportistas los costos de operación -dado el carácter confidencial con el que suelen tratarse estos datos y por su valor como elemento de competencia- es posible observar la estructura básica de costos de autotransportistas y de ferroviarios, de los datos que publica el INEGI en su serie de la Encuesta Anual de Transporte. Las figuras 2.4 y 2.5

muestran las estructuras de gastos del autotransporte y del ferrocarril para el año 2011.

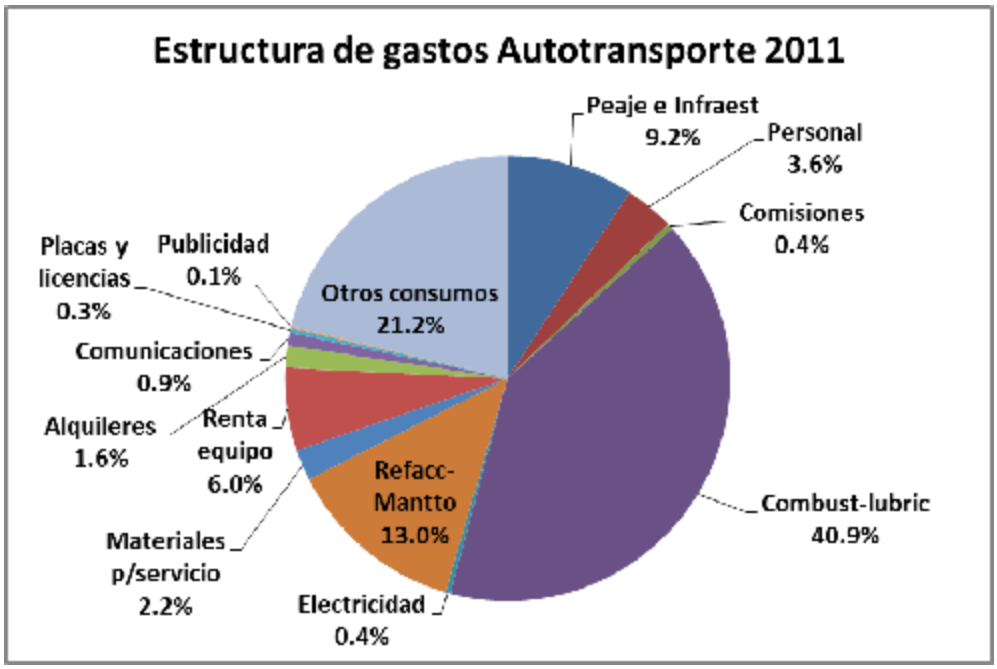


Figura 2.4. Estructura de costos del Autotransporte en 2011 (Fuente: INEGI, Encuesta Anual de Transporte 2012).

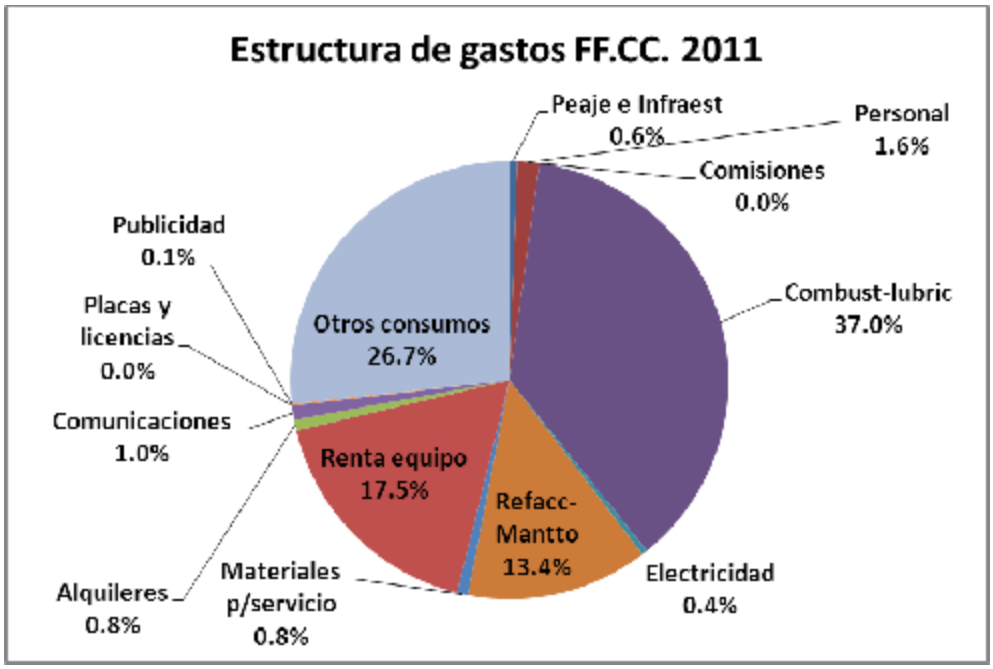


Figura 2.5. Estructura de costos del Ferrocarril en 2011 (Fuente: INEGI, Encuesta Anual de Transporte 2012).

Para el autotransporte, los principales componentes específicos de costo son: combustibles y lubricantes (40.9%); refacciones y mantenimiento (13.0%); peaje y pago de infraestructura (9.2%) y renta de equipo (6%), que acumulan 69.1% del total de gastos. El concepto de "otros consumos" no está diferenciado en los datos del INEGI.

Para el ferrocarril, los principales componentes específicos de costo son: combustible y lubricantes (37%), renta de equipo (17.5%); refacciones y mantenimiento (13.4%) y personal (1.6%); que acumulan 69.5% del gasto total

Las estructuras de costo muestran que ambos modos tienen porcentajes de gasto semejantes en combustibles y lubricantes; aunque el ferrocarril, con un porcentaje ligeramente menor. El peaje y pago de infraestructura es importante para el autotransporte (9.2%), pero no para el ferrocarril (0.6%). La renta de equipo es mucho más importante para el ferrocarril (17.5%) que para el autotransporte (6%), mientras que el pago a personal es más importante para el autotransporte (3.6%) que para el ferrocarril (1.6%).

Estas diferencias en las estructuras de costo dan una idea de las ventajas y desventajas de cada modo, respecto de cambios en los distintos insumos que utilizan. De este modo, los aumentos de precios en combustibles y lubricantes probablemente afectarán de modo parecido a los dos modos, mientras que un aumento de los peajes carreteros afectará mucho más al autotransporte que un aumento en los derechos de paso ferroviarios afectaría al ferrocarril. Análogamente, es probable que los aumentos salariales afecten más al autotransporte que al ferrocarril.

Estas diferencias en las estructuras de costos pueden ser una guía para la búsqueda de políticas de fomento o de inhibición de los movimientos en los modos, con el propósito de promover un mejor reparto modal entre ellos.

La implementación de mejoras en el reparto modal, sin embargo, no se da con el solo argumento de la eficiencia energética. Los aspectos de cobertura geográfica de los dos modos, la confiabilidad en el servicio, sus respectivas tarifas, la rapidez en la entrega, la posibilidad de dar un servicio puerta-a-puerta y otras consideraciones prácticas deben ser consideradas.

El consumo energético

La preocupación por el consumo racional de los combustibles fósiles es una cuestión generalizada en todos los procesos de planeación a nivel nacional.

En 2012, el consumo final de energía, en el país, fue de 4,902 PetaJoules, el principal consumidor fue el sector transporte. La figura 2.6 muestra el consumo final de energía en México, en 2012, para los principales sectores económicos;

donde el sector Transporte representa el 46.6%. El consumo final energético del sector transporte, en 2012, reportado por la Secretaría de Energía fue de 2,282 PetaJoules de los cuales: 66.0% corresponden a gasolinas, 27% a diésel, 5.3% a querosenos, 0.2% a electricidad y 0.02% a combustóleo (SENER, 2012).

De estos consumos reportados, el diésel es el combustible más utilizado por el autotransporte tanto de carga como de pasajeros; y de los porcentajes reportados representa alrededor de 616.14 PetaJoules, que son aproximadamente 15,962 millones de litros. La conversión a litros de diésel puede hacerse considerando que 1 litro de diésel = 38.6 MegaJoules (The Physics Factbook, 2009).

Tanto el modo carretero como el ferroviario son grandes consumidores de diésel. La eficiencia en su uso sin embargo, es distinta, y está relacionada con las características técnicas con que opera cada modo.

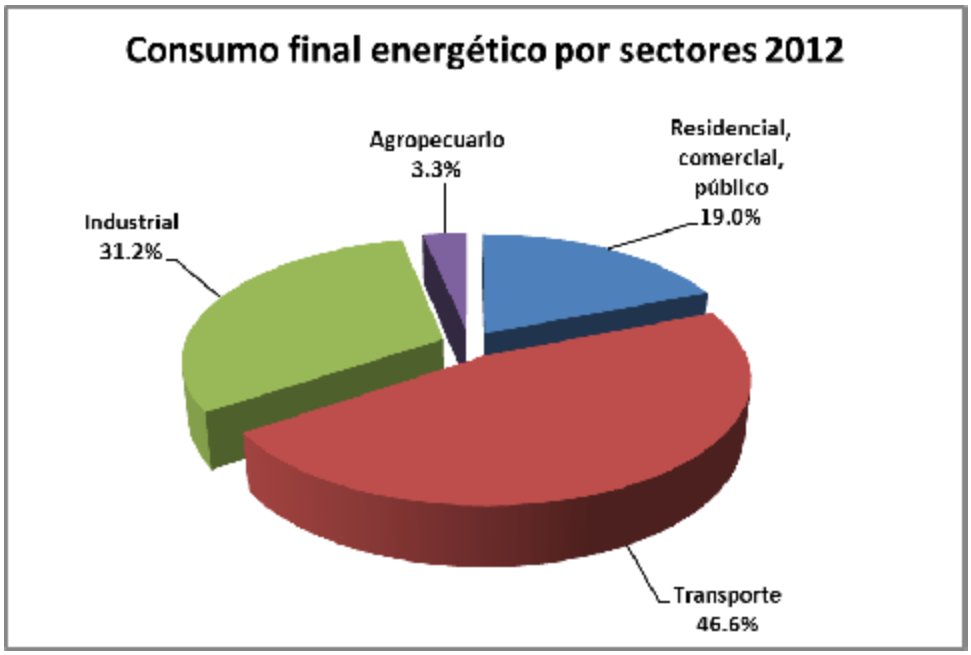


Figura 2.6. Consumo final de energía en México en 2012(Fuente: SENER, Balance Nacional de Energía 2012).

La Figura 2.7 muestra los consumos de diésel en el transporte de carga para los modos carretero y ferroviario en el periodo 2001 – 2012 donde se nota un menor consumo del modo ferroviario respecto al carretero, y una tendencia creciente de este último.

Con base en las estadísticas publicadas por la Secretaría de Energía de México, en su Balance Nacional de Energía (IMT, 2012) sobre la energía consumida anualmente por los modos de transporte y la información publicada por la Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal (2012) de la SCT, se puede obtener una estimación agregada del número de toneladas transportadas por cada litro de diésel consumido por el autotransporte y el ferrocarril.

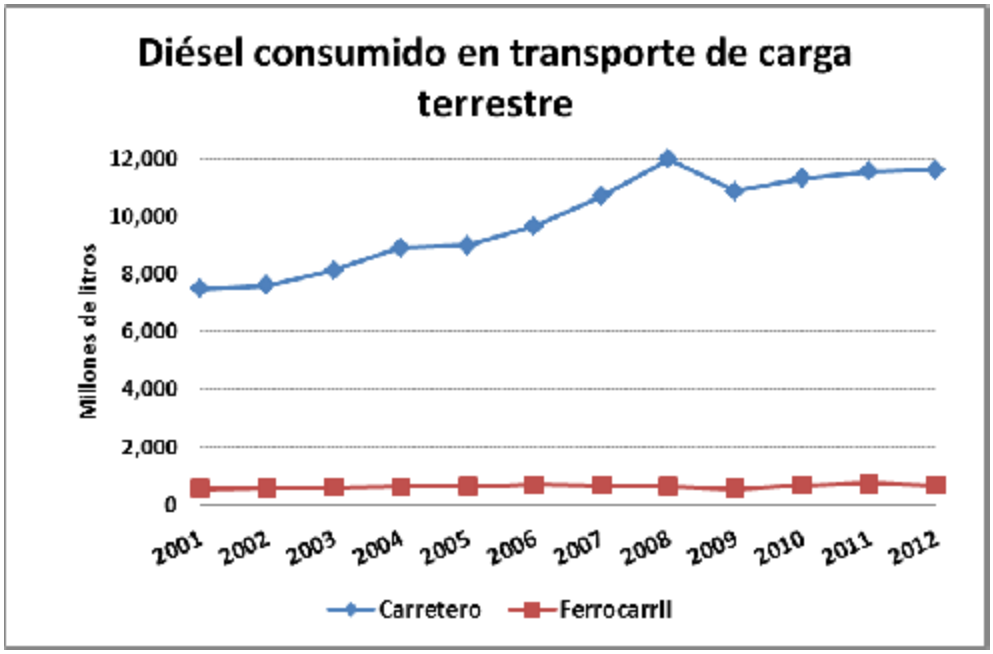


Figura 2.7 Consumo de diésel en el transporte de carga (con base en: SENER, Balance Nacional de Energía 2012; Anuario Estadístico SCT 2012 y Anuario Estadístico Ferroviario 2012 DGTFM).

Las eficiencias de los dos modos en cuanto consumo de combustible aparecen en las figuras 2.8 y 2.9, que muestran las toneladas movidas y las toneladas-kilómetro por litro de diésel consumido.

En estas gráficas se puede observar que la eficiencia energética del ferrocarril es entre 3 y 4 veces mayor que para el autotransporte; lo cual corrobora la diferencia en la eficiencia tecnológica señalada anteriormente.

Para el transporte ferroviario se usaron los datos del Anuario Estadístico Ferroviario 2012 que publica la Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal de la SCT (DGTFM, 2013).

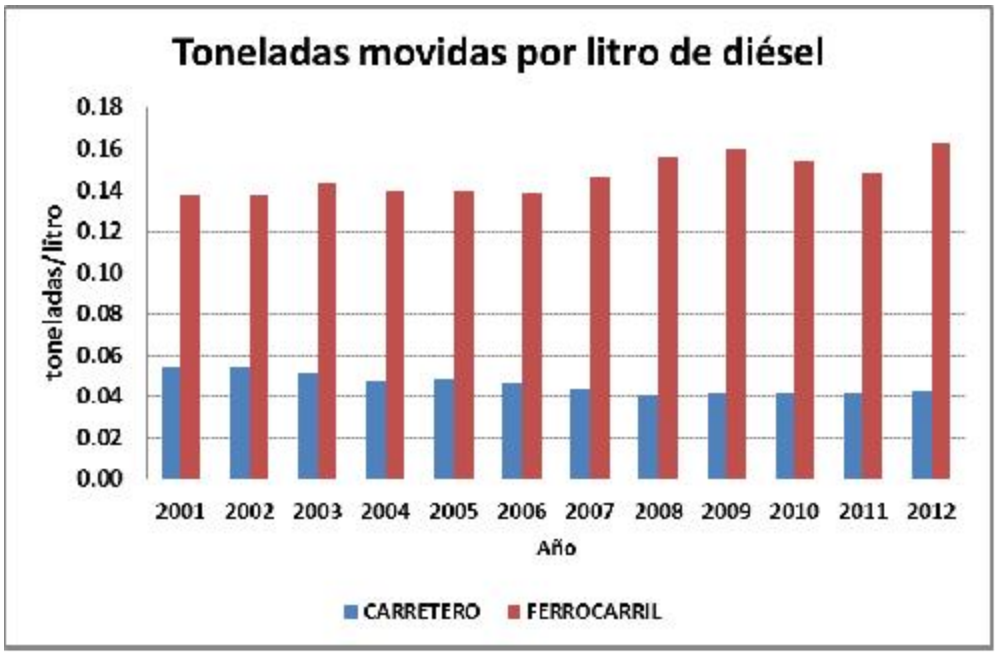


Figura 2.8. Eficiencia energética para toneladas movidas. Autotransporte y F.C. (con base en: IMT, Manual Estadístico 2012 2012 y Anuario Estadístico Ferroviario 2012 DGTFM).

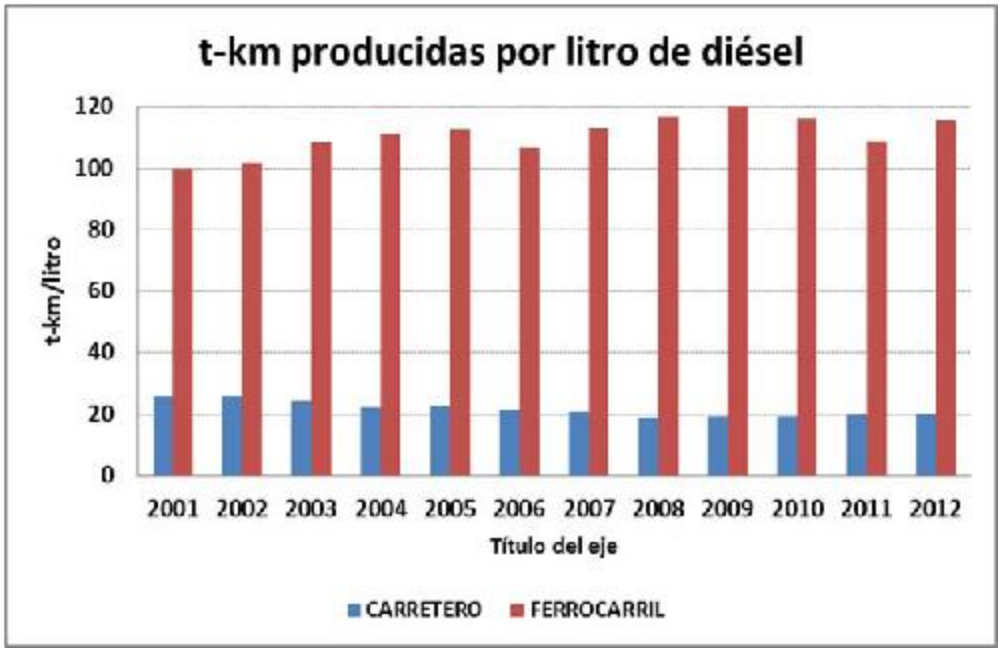


Figura 2.9. Eficiencia energética para t-km. Autotransporte y F.C. (con base en: IMT, Manual Estadístico 2012 2012 y Anuario Estadístico Ferroviario 2012 DGTFM).

En los capítulos siguientes, se tratan algunas de estas consideraciones y los posibles escenarios de reparto modal que pudieren fomentar un mayor uso del ferrocarril, siempre que existan condiciones atractivas a los clientes que usan el servicio de carga.

3 Conformación de la red de transporte terrestre

Este capítulo describe la construcción de la red bimodal carretera-ferrocarril utilizada para la modelación de las asignaciones de carga en el reparto modal. La representación de las redes carretera y ferroviaria fue realizada con las herramientas disponibles en el software TransCAD, usando datos de las carreteras federales y la infraestructura concesionada a las principales empresas ferroviarias que operan en México.

Las dos redes fueron obtenidas previamente en formato *ESRI Shapefile* usando una proyección Cónica Conforme de Lambert (CCL) con las siguientes características:

- Esferoide: Clarke 1866
- Meridiano Central: -102°
- Latitud de referencia: 12°
- Paralelo estándar 1: 17.5°
- Paralelo estándar 2: 29.5°
- Falso Este: 2500000
- Falso Norte: 0

El formato ESRI Shapefile es un estándar muy utilizado en el intercambio de información entre sistemas de información geográfica. En cuanto a la proyección, se eligió la CCL ya que es de uso común para representaciones del territorio a nivel nacional.

Características de la red bimodal

La red carretera está formada por 9,218 arcos; 8,612 nodos y 564 centroides (ciudades principales y localidades del país) que se extienden a lo largo de 56,363 kilómetros, de los cuales 44,400 son administrados por el gobierno federal; 8,616 administrados por el gobierno estatal; 2,496 administrados por el municipio y el restante es administrado por particulares o no se encuentra descrito.

La figura 3.1 muestra la red carretera utilizada. Dicha red está georreferenciada, y para la modelación dispone de una capa de información con los siguientes atributos: distancia, tiempo de viaje (en minutos) y capacidad (vehículos por hora).

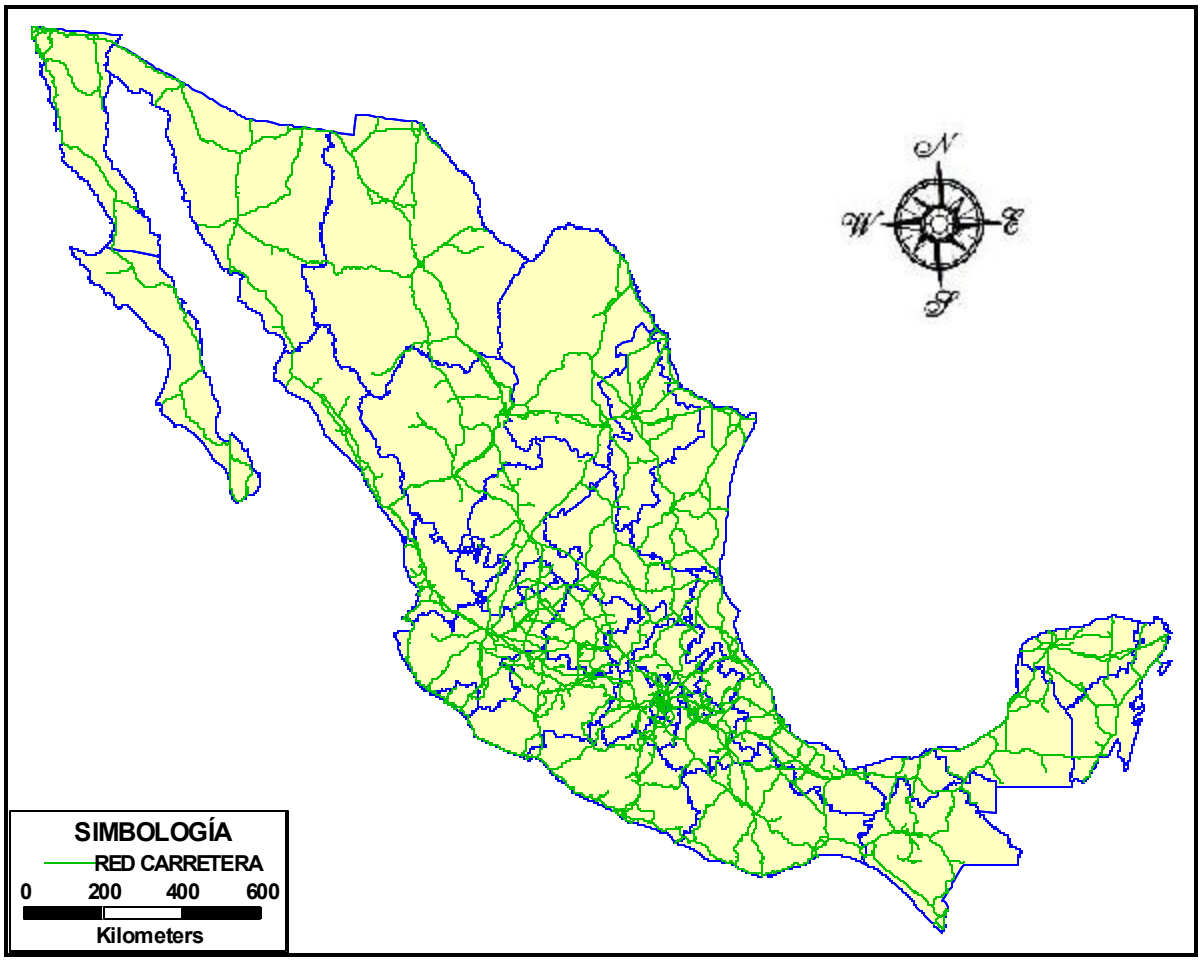


Figura 3.1. Representación de la red carretera nacional.

La red ferroviaria georreferenciada fue obtenida en formato Shape y se cambió a una proyección CCL, con las mismas especificaciones que la Red Carretera, para asegurar el ajuste entre las dos capas.

La red de ferrocarril está conformada por 3,430 arcos; 3,357 nodos y 840 centroides (estaciones de ferrocarril), como se puede apreciar en la figura 3.2.

La longitud de la red de ferrocarril es de 21,066.27 kilómetros asociados a una tabla con información con los atributos: distancia, velocidad máxima de operación y tiempo de viaje (en minutos).

Figura 3.2. Representación de la red ferroviaria nacional.

Para conformar la red bimodal, se unieron ambas redes a través de conectores a centros de transferencia intermodal; los que representan terminales intermodales o instalaciones especializadas de empresas importantes que pueden manejar carga ferroviaria.

Cada conector va desde el centro de transferencia intermodal a una carretera, mientras que el otro conector se enlaza directamente a una vía de ferrocarril como aparece en la figura 3.3. La imagen muestra, a manera de ejemplo, un esquema de la disposición de un tramo ferroviario, un tramo carretero y las conexiones carretera-ferrocarril y ferrocarril-carretera en la Terminal Intermodal Mexicali. Para asegurar la transferencia entre los modos y poder medir la cantidad de carga, que pasa de un modo a otro, se direccionaron los arcos.

Figura 3.3. Conectividad entre los dos modos de transporte a través de los conectores. Terminal Intermodal Mexicali. (Fuente: elaboración propia con datos de la SCT).

Los nodos de transferencia intermodal, para conectar los modos carretero y ferroviario, fueron seleccionados de una base de datos nacional para disminuir la duplicidad de registros a 43, las cuales aparecen en la tabla 3.1, que se presenta a continuación.

Tabla 3.1. Terminales intermodales de transferencia de carga entre el autotransporte y el ferrocarril. (Fuente: elaboración propia con datos de la SCT-UNAM/2012).

No	Nombre de la terminal	No	Nombre de la terminal
1	Terminal Intermodal Mexicali	23	Terminal de Carga de Irapuato
2	Terminal Intermodal Hermosillo	24	Sylo, S.A. de C.V., Querétaro
3	Terminal de Cross dock Hermosillo	25	Terminal de Cross dock Viborillas
4	Terminal de Cross dock Ciudad Obregón	26	Terminal Intermodal Puerta México
5	Terminal Intermodal Chihuahua	27	Terminal Intermodal Maclovio Herrera
6	Terminal Intermodal Torreón	28	Terminal Intermodal Tacuba
7	Ferrogranos México, S.A. de C.V	29	Terminal Intermodal de Pantaco
8	Servicios Integrales y Especializados de Coahuila, SAPI de C.V.	30	Terminal Intermodal Plasgranel
9	Terminal Multimodal de Altamira	31	Terminal de Trasvase Cuautitlán
10	T.I Interpuerto San Luís de Potosí	32	Terminal Automotriz Toluca
11	Bulkmatic de México, S de R.L. de C.V., San Luís de Potosí	33	Distribución y Servicios Logísticos, S.A. de C.V.
12	Siderúrgica de San Luís S.A. de C.V.	34	Bulkmatic de México, S de R.L. de C.V., Atitalaquia
13	Tracomex, S.A. de C.V.	35	Terminal Intermodal Puebla
14	Jalmex Empresarial, S.A. de C.V.	36	Almacenes y Maniobras Integrales del Golfo, S.A. de C.V.
15	Silos Tysa, S.A. de C.V., Guadalajara (SOL)	37	Intl. De Contenedores Asociados de Veracruz (ICAVE)
16	Silos Tysa, S.A. de C.V., Guadalajara (LIQ)	38	Terminal Intermodal Veracruz
17	Bulkmatic de México, S de R.L. de C.V, Guadalajara	39	Terminal Intermodal Coatzacoalcos
18	Terminal de Combustible Lázaro Cárdenas	40	Terminal de Cross dock Ciudad Juárez
19	Debruce Grain de México S.A. de C.V.	41	Terminal Intermodal Monterrey
20	Terminal de Trasvase San Francisco del Rincón	42	Ferrotolvas, S.A. de C.V.
21	Terminal de Cross dock León	43	Terminal Intermodal Manzanillo
22	Terminal Intermodal Silao		

Una vez que fueron integradas ambas redes, se realizaron pruebas de conectividad, con la finalidad de asegurar la existencia de rutas disponibles entre todos los pares OD.

Para lograr esto, se eligieron aleatoriamente diversos centroides (tanto de carretera como de ferrocarril) y se utilizó la herramienta de TransCAD para encontrar la ruta más corta desde un centroide ubicado en la carretera hasta un centroide de ferrocarril y viceversa. Se muestran un par de ejemplos.

En la figura 3.4 aparece la ruta más corta desde Reynosa (ubicado en la red carretera) hasta la estación de ferrocarril denominada Espinazo.

En la figura 3.5 se observa una ruta más corta que cambia de modo carretero a modo ferroviario. Estos dos casos comprueban la conectividad de la red bimodal.

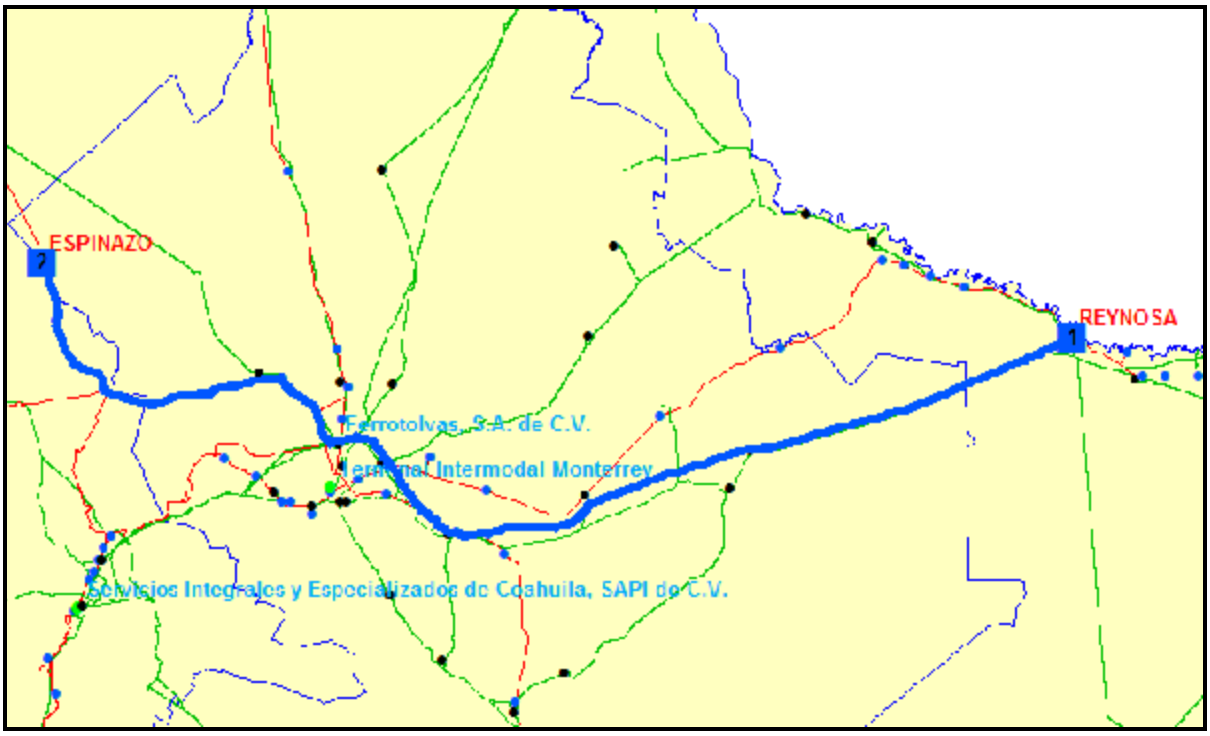


Figura 3.4. Conectividad desde un punto carretero (Reynosa) hasta una estación de ferrocarril (Espinazo) utilizando la herramienta de ruta más corta del software TransCAD.

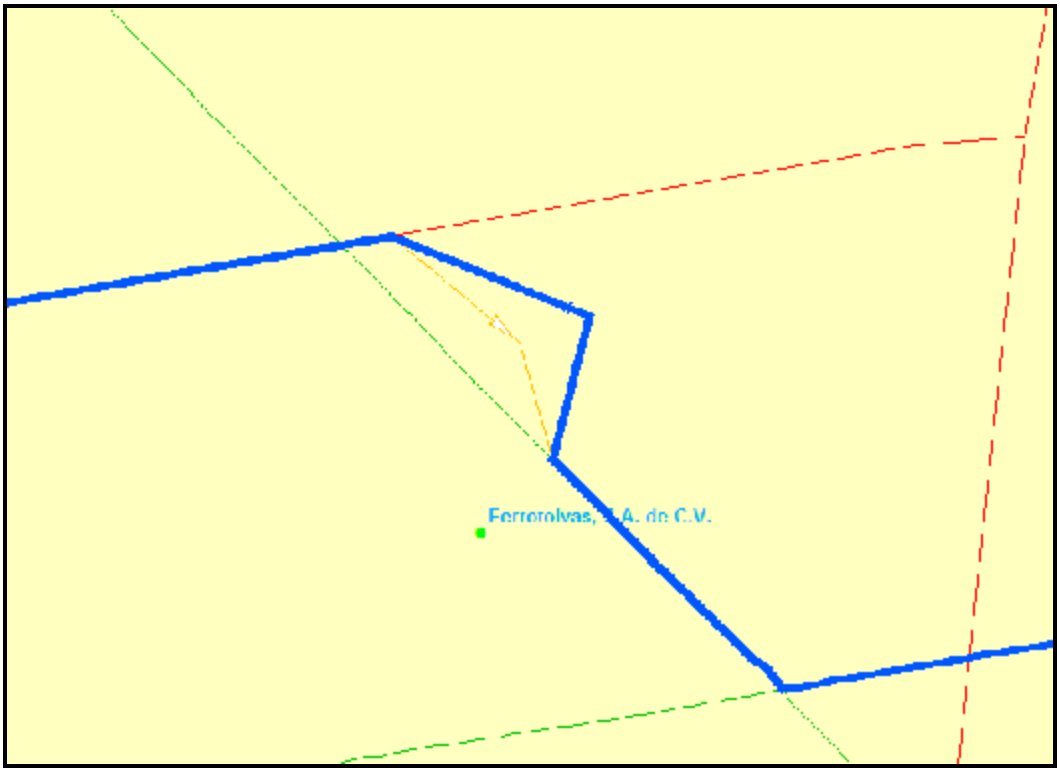


Figura 3.5. Acercamiento al centro de transferencia donde la ruta más corta cambia del modo carretero al modo ferroviario utilizando la herramienta de ruta más corta del software TransCAD.

Después de asegurar la plena conectividad de la red, mediante las reparaciones correspondientes, se procedió a establecer las variables de entrada para los distintos tipos de arco. Dichas variables y sus características aparecen en la tabla 3.2.

Con la finalidad de identificar los tipos de productos transferibles del modo carretero al modo ferroviario y viceversa, fue necesario integrar –en un solo archivo geográfico– un conjunto que contiene por un lado la red de carreteras en el país y por otro lado, la red ferroviaria.

Tabla 3.2 Variables de entrada por tipo de arco para el modelo de asignación intermodal.

Variable	Tipo de arco		
	Carretera	**Ferrocarril**	**Conector**
Distancia	Calculada de acuerdo con la proyección	Calculada de acuerdo con la proyección	Calculada de acuerdo con la proyección
Tiempo	Calculado con velocidades promedio registradas en las carreteras	Estimado utilizando el 80% de la velocidad máxima	En el modelo de asignación inicial, se estimó en 24 horas la transferencia de carretera a F.C. y 12 horas para la transferencia F.C. a carretera
Capacidad	Calculada de acuerdo con las capacidades reportadas en el manual de operación por tipo de carretera y número de carriles	No fue requerida	El número de operaciones reportadas por los centros de transferencia es variable: cajas, vehículos, toneladas, TEUs y unidades ferroviarias; además no se cuenta con información para todos los centros de transferencia por lo que se decidió estimar la capacidad de los conectores tomando 1,800 TEUs con un promedio de 6 toneladas.
Costo	Estimada utilizando el modelo del Banco Mundial para el cálculo del Costo de Operación Vehicular	Estimada por tipo de terreno	
Alfa	0.83 (multicarril) ó 0.71 (2 carriles)	0	0.71
Beta	2.7 (multicarril) ó 2.1 (2 carriles)	1	2.1

Ya uniformadas las estructuras de datos de ambos archivos (red carretera y ferroviaria), fueron importados por separado al formato de TransCAD. Una vez generados los archivos geográficos, se utilizó la instrucción de TransCAD *"Merge Geography"* para unirlos y formar la red bimodal.

Para conjuntar las dos redes, fue necesario tomar en cuenta las variables de entrada del modelo de asignación, así como las diferencias y compatibilidades en el aspecto físico; aspectos imprescindibles para el modelado tanto de los arcos, como de los nodos que forman dicha red bimodal.

Tales diferencias y compatibilidades son detalladas más adelante, en las descripciones del modelado de la red bimodal.

4 Un modelo para la red de transporte terrestre

Este capítulo muestra el desarrollo del modelo de la red de transporte terrestre y de los supuestos para generar las asignaciones de flujo, con los datos disponibles para los dos modos.

4.1 El modelo de asignación

El modelo de asignación es el cuarto paso del paradigma clásico de cuatro etapas de la planeación del transporte: 1) generación de viajes, 2) distribución, 3) elección modal y 4) asignación.

La etapa de asignación utiliza una matriz origen-destino (O-D) de viajes, en una red de transporte y alguna medida de la dificultad o costo de cruzar por los arcos para pronosticar los flujos que resultan en la red. Este conjunto de flujos, sin embargo, no es el único resultado de interés que se busca con la etapa de asignación. Otros resultados que son de interés para la planeación de un sistema de transporte son los siguientes (Ortúzar and Willumsen, 2011).

- Estimar medidas agregadas en la red de transporte; como flujos totales de vehículos, tiempo total empleado en los movimientos en la red, total de toneladas movidas en algún corredor, etc.
- Estimar los costos o tiempos en los movimientos entre zonas determinadas de la red dado un nivel de demanda.
- Estimar aproximadamente los flujos en los arcos para identificar aquellos que estén muy congestionados.
- Pronosticar las rutas que se usan para cada par O-D.
- Examinar cuáles pares O-D emplean un arco o una ruta en particular.

Para la estimación de los flujos en la red, la representación del costo o impedancia se hace mediante las llamadas funciones volumen-demora, que modelan la dificultad (en términos de costo generalizado, o tiempo) que hay de transitar por los arcos de la red, considerando la presencia de otros usuarios en los mismos arcos.

Varias funciones de volumen-demora han sido propuestas en la literatura; la función del Bureau of Public Roads norteamericano (BPR) es descrita por la siguiente ecuación:

$$t(x) = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x}{C}\right)^{\beta}\right]$$

donde

t_0 = tiempo de viaje a flujo libre

x = flujo en el arco

C = capacidad

α, β parámetros de calibración.

La función BPR es de las más usadas en la modelación de flujo de tránsito; una recomendación común en referencias básicas y manuales de software es emplearla para $\alpha = 0.15$ y $\beta = 4$; valores que han sido aplicados frecuentemente en modelación de redes urbanas. Por esta razón, en este trabajo llamaremos a esta particular función, *función BPR estándar*.

Otros valores de los coeficientes han sido calibrados en los Estados Unidos, para autopistas (Freeways) y carreteras multicarril (Multilane) para varias velocidades de diseño. La tabla 4.1 muestra estos valores.

Tabla 4.1. Valores α y β para distintas vías y sus velocidades de diseño en los EE.UU. (NCHRP, 1998).

	Autopistas			Multi-carril		
Coeficiente	70 mph 113 km/h	60 mph 97 km/h	50 mph 81 km/h	70 mph 113 km/h	60 mph 97 km/h	50 mph 81 km/h
α	0.88	0.83	0.56	1	0.83	0.71
β	9.8	5.5	3.6	5.4	2.7	2.1

En las figuras 4.1 y 4.2 se muestran las curvas de las funciones BPR para las autopistas y las carreteras multicarril norteamericanas, comparadas con la función estándar de $\alpha = 0.15$ y $\beta = 4$.

El tiempo de flujo libre se supone unitario, para hacer las comparaciones en condiciones de saturación; es decir, cuando el flujo alcanza la capacidad de las vías.

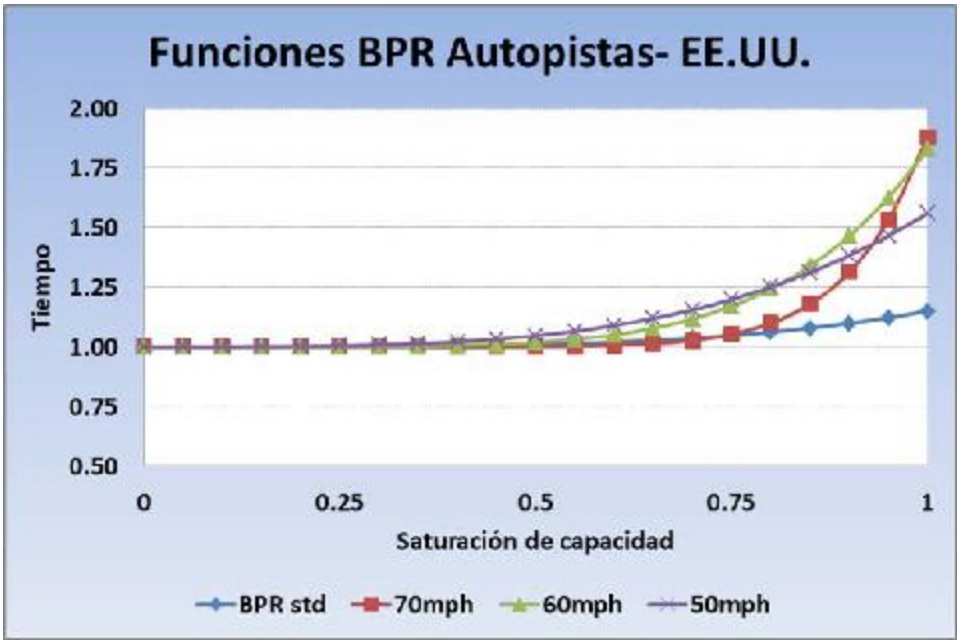


Figura 4.1. Curvas de la función BPR para autopistas norteamericanas (con datos de NCHRP, 1998).

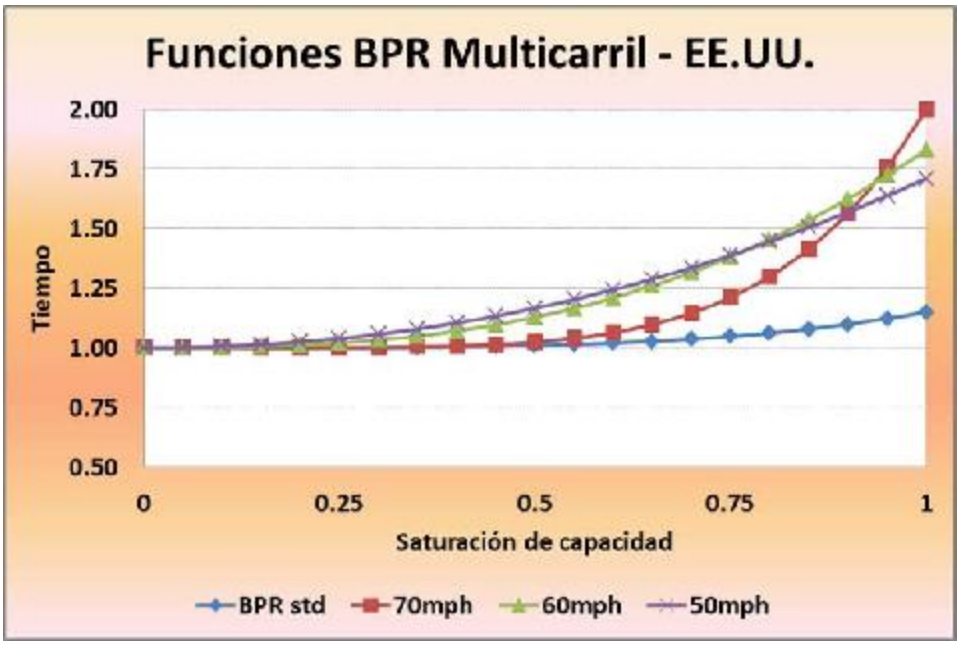


Figura 4.2. Curvas de la función BPR para vías multicarril norteamericanas (con datos de NCHRP, 1998).

En estas curvas, podemos ver que en el nivel de saturación, tanto autopistas como carreteras multicarril, el tiempo de recorrido supera ampliamente al correspondiente de la función estándar.

De igual modo, se puede ver que las curvas para autopistas crecen más lentamente que las correspondientes para carreteras multicarril, al comparar las mismas velocidades de diseño.

Una carretera multicarril es una carretera principal que conecta dos o más destinos. Tiene al menos dos carriles para el uso exclusivo de tránsito vehicular en cada dirección, sin control o con control parcial de acceso; puede tener interrupciones del flujo mediante intersecciones con semáforos, pero a una distancia no menor a tres kilómetros. Por lo general se encuentran en zonas suburbanas que conducen a ciudades centrales o en los corredores rurales de gran volumen, en que se conectan dos ciudades o centros de actividades importantes que generan un considerable número de viajes diarios.

Por su parte, las autopistas son carreteras que se separan del resto del tránsito y sólo es posible ingresar y salir de ellas por medio de accesos controlados. Las rampas de incorporación y desincorporación permiten cambios de velocidad entre la autopista y las vías arteriales y vías colectoras. Los flujos en direcciones opuestas de tránsito en una autopista están separados físicamente por una reserva central (mediana), tal como una tira de hierba o piedras o por una barrera de tránsito. El cruce de una autopista se realiza estrictamente por pasos superiores e inferiores, pues no hay intersecciones a nivel.

Las especificaciones de diseño geométrico de las autopistas y carreteras multicarril son más altas que las utilizadas para las carreteras y vías de un carril por sentido. Un aspecto relevante en la calidad de la operación es que, al haber varios carriles de circulación por sentido, los rebases se realizan sin invadir el sentido contrario, lo cual aumenta notablemente la velocidad de operación.

Las especificaciones más altas de las autopistas y carreteras multicarril incluyen diseños con menores pendientes y curvas más abiertas, casi siempre con fases de transición más largas entre tangentes y curvas; lo cual las hace más cómodas y seguras.

Las mayores especificaciones de diseño hacen que la construcción y mantenimiento de autopistas y carreteras multicarril sea más costosa y por lo tanto solo se justifican en corredores de intenso tránsito en los que se puede amortizar la inversión en tiempos menores. Por lo anterior, las autopistas suelen ser vías de peaje (lo cual se facilita por el control de accesos), a diferencia de las carreteras multicarril, que suelen ser libres de peaje.

Las diferencias en los valores de los parámetros de la función BPR para carreteras de dos carriles, multicarril y autopistas, son explicadas en función de las diferentes elasticidades de los tiempos de recorrido a la presencia de mayor o menor tránsito, pues al ser mucho más altas las velocidades de operación en autopistas y algunas carreteras multicarril, es natural que la afectación en los tiempos de recorrido sea más rápida que en las carreteras de dos carriles o en las vías urbanas, en donde suele haber intersecciones con relativa frecuencia.

El parámetro α en la función BPR puede ser interpretado como el porcentaje en que aumenta el tiempo de flujo libre al llegar a la saturación, por tanto es de esperar que en una carretera con mayor velocidad de proyecto, el efecto del aumento del flujo repercuta en mayor medida que en carreteras con menores especificaciones; de ahí que se propongan valores mucho mayores al 0.15 que se usa en vías urbanas. De la misma manera, el parámetro β puede ser interpretado como la elasticidad del tiempo de tránsito con respecto al volumen de flujo en condiciones de saturación.

Considerando que en México las condiciones de operación promedio son menos favorables que sus correspondientes en los Estados Unidos, en nuestra opinión resulta razonable utilizar los valores de los parámetros calibrados en EEUU para los casos de menores especificaciones de diseño; es decir, las carreteras multicarril de 60 y 50 mph. La tabla 4.2 muestra los parámetros usados en la modelación.

Tabla 4.2. Valores α y β usados en la modelación (elaboración propia).

	Autopistas		Libres de peaje	
Coeficiente	100 km/h	80 km/h	100 km/h	80 km/h
α	0.83	0.56	0.83	0.71
β	5.5	3.6	2.7	2.1

En vías urbanas se manejan velocidades menores, por lo que la disminución de la velocidad al aumentar el flujo es inferior que la que se podría dar para ese mismo aumento de flujo si este se presentara en una carretera interurbana y menor todavía a la presentaría en una autopista.

Una vez determinadas las funciones de volumen-demora, el proceso de asignación trata encontrar las rutas que emplearán los usuarios para sus viajes. El supuesto básico de la asignación es que los usuarios buscarán las rutas de menor costo (o tiempo) para llegar a su destino.

En una red carretera donde los usuarios tienen libertad de elegir sus rutas, es de esperar que cada uno trate de encontrar la mejor ruta dada la congestión resultante de la presencia de otros usuarios en el camino. De esta manera, los usuarios que perciban un camino congestionado empezarán a cambiar a otras rutas donde esperan mejores costos (o tiempos) de recorrido, y estos cambios de ruta se producirán hasta llegar a un punto de equilibrio donde ya no sea posible mejorar las rutas.

En este caso, el paradigma que representa la situación se conoce como *Equilibrio del Usuario (EU)*, que corresponde con el llamado *Primer Principio de Wardrop.*

Este principio, desarrollado por J.G. Wardrop en 1952, establece que (Ortúzar and Willumsen, 2011):

Bajo condiciones de equilibrio el tránsito se acomoda por sí mismo en una red congestionada de modo que todas las rutas usada entre un par O-D tengan el mismo costo mínimo, mientras que las rutas no utilizadas tengan costos iguales o mayores.

La modelación para la parte de la red que corresponde a las carreteras se realiza entonces utilizando el *Equilibrio de Usuario* para tener una representación realista de los flujos derivados del comportamiento de los usuarios en el camino.

En el caso de la red ferroviaria, el tratamiento es distinto. En este caso, la modelación se hace utilizando la llamada *Asignación Todo o Nada*. Esta asignación es el método de asignación más simple; no incluye efectos de congestión por la presencia de otros usuarios en la misma vía, y se considera adecuada por la forma de operar de los ferrocarriles. De esta manera, los usuarios de la vía férrea perciben los mismos costos (tiempos) y atributos del camino para cada par O-D.

Tanto el equilibrio del usuario como la asignación todo o nada están disponibles en el paquete TransCAD, que tiene implementados los algoritmos adecuados para ello.

Adicionalmente, ya que el modelo toma en cuenta otras variables como el valor del tiempo para la carga, restricciones de paso para determinados tipos de producto en alguno de los dos modos, capacidades distintas en ambos modos, etcétera; se decidió utilizar el modelo de asignación multimodo multiclase incluido como algoritmo en el software TransCAD así como emplear la función BPR (descrita en párrafos anteriores) como función volumen-demora dentro de la siguiente función de costo generalizado (Caliper, 2007).

$$gc_{OD}^{m} = \sum_{i \in A_{OD}^{m}} \left\{ VOT^{m} * VDF\left(t_a, c_a, x_a\right) + FT_a^{m} \right\} + \sum_{m \in M_{OD}^{m}} MT_m^{i}$$

donde:

gc_{OD}^{m} costo generalizado entre el par O-D para el modo m

m modo de transporte a utilizar

a arco

OD par origen - destino

A_{OD}^{m} conjunto de arcos en la ruta más corta del origen *O* al destino *D* para el modo *m*

VOT^{m} valor del tiempo para el modo *m*

t_a tiempo de viaje a flujo libre en el arco *a*

c_a capacidad en el arco *a*

FT_a^m peaje en el arco *a* para el modo *m*

M_{OD}^{m} conjunto de nodos basados en las secciones de peaje entre un par *OD* para el modo *m*

MT_m^i valor de la tarifa para la sección *i* en el modo *m*

VDF función Volumen-Demora

x_a volumen total asignado al arco *a,* calculado por la suma $\sum_m \left(PCE^{\,m} x_a^m\right)$

x_a^m flujo del modo *m* en el arco *a*

$PCE^{\,m}$ equivalente pasajeros vehículo para el modo *m*

El valor del tiempo utilizado en las modelaciones es igual a 1, para ambos modos; ya que, por el momento, no se cuenta con la información suficiente para determinar el valor adecuado de VOT por modo.

4.2 Supuestos y restricciones de la modelación

Una vez definida la función de costo por minimizar, se procedió a establecer las restricciones del modelo basadas en las siguientes hipótesis.

La primera suposición establece que las empresas eligen embarcar sus productos por el modo de transporte que más les convenga en términos de la distancia, el tiempo de viaje o el costo, expresado en términos del costo de operación por modo, para cada par origen-destino.

Las decisiones de envíos de carga de las empresas por los dos modos surgen en las correspondientes matrices O-D (de origen-destino), y el movimiento por las redes de transporte se hace de modo que el transportista incurra en el costo más bajo posible para entregar las cargas.

La segunda suposición es que la naturaleza del tipo de producto también influye para definir el modo de transporte por utilizar; por ejemplo, los productos perecederos se trasladan casi en su totalidad en autotransporte.

La tercera suposición es que los productos que serán transportados una distancia entre origen y destino menor a 400 km, utilizan el autotransporte; la utilización del ferrocarril resulta impráctica, esencialmente por las maniobras adicionales requeridas.

La cuarta suposición es que hay determinados productos que solo son transportados por autotransporte; fundamentalmente por sus características económicas, naturales, o logísticas.

Las segunda, tercera y cuarta suposiciones han dirigido al modelo a establecer una clasificación de los pares origen – destino (O-D) por tipo de producto y de esta manera establecer restricciones para el modelo de asignación. La clasificación de los productos se describe en la matriz O-D.

4.3 La matriz origen-destino

Para cumplir con las restricciones previamente señaladas, fue necesario clasificar las matrices O-D, por tipo de producto, para ambos modos. Sin embargo, se encontró que para la matriz O-D carretera el detalle de los productos era mayor respecto a la ferroviaria y se consideró conveniente homologar la clasificación de ambos modos con la clasificación utilizada en el ferrocarril.

La clasificación utilizada es la siguiente:

1. Productos industriales
2. Hierro, acero y sus derivados
3. Productos químicos
4. Graneles agrícolas
5. Graneles líquidos
6. Graneles minerales
7. Productos forestales

8. Equipo ferroviario
9. Petrolíferos
10. Contenedores
11. Vehículos nuevos y autopartes
12. Otros

Dentro de la clasificación de los productos que viajan por ferrocarril, no se incluyó la de materiales peligrosos; sin embargo, esta sí fue incluida en la matriz O-D carretera. La homologación de los tipos de productos aparece en el anexo A, al final de este documento.

Una vez realizada dicha clasificación, se procedió a generar las matrices O-D con datos obtenidos para el año 2010, separadas por tipo de producto y por modo por el que circulan, y así obtener el reparto de toneladas en ferrocarril que muestra la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Reparto de toneladas por ferrocarril.

Tipo de producto	Toneladas	Participación %
Productos industriales	14,995,315.64	13.31%
Hierro, acero y sus derivados	10,904,810.04	9.68%
Productos químicos	8,426,004.71	7.48%
Graneles agrícolas	28,607,914.39	25.40%
Graneles	1,740,342.50	1.54%
Graneles minerales	28,298,799.31	25.12%
Productos forestales	1,291,597.55	1.15%
Equipo ferroviario	219,069.38	0.19%
Petrolíferos	6,559,012.81	5.82%
Contenedores	6,763,247.30	6.00%
Vehículos nuevos y autopartes	4,079,969.40	3.62%
Otros	761,196.45	0.68%
Total	**112,647,279.48**	

Para el modo carretero, obtuvimos la distribución de carga que muestra la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Reparto de toneladas por carretera.

Tipo de producto	Toneladas	Participación %
Graneles agrícolas	4,256,192.00	0.83%
Graneles minerales	10,295,920.00	2.01%
Petrolíferos	5,173,072.00	1.01%
Materiales peligrosos	731,168.00	0.14%
Graneles líquidos	6,617,888.00	1.29%
Contenedores	114,401,161.60	22.33%
Carga general no contenerizada	9,039,152.00	1.76%
Productos químicos	8,536,912.00	1.67%
Productos forestales	6,840,392.00	1.34%
Hierro, acero y sus derivados	21,598,656.00	4.22%
Equipo ferroviario	106,288.00	0.02%
Vehículos nuevos y autopartes	12,780,840.00	2.50%
Productos que viajan exclusivamente por carretera	94,112,300.81	18.37%
Productos con traslado menor a 400 km	217,737,158.38	42.51%
Total	**512,227,100.79**	

Como se puede apreciar en las figuras anteriores, los graneles minerales y agrícolas son los dos productos más importantes que mueve el ferrocarril, mientras que por carretera son más los contenedores. Cabe destacar que el 39% de la carga total movida por autotransporte es susceptible de ser transportada por ferrocarril; y si esto sucediera, bajo un escenario optimista, se igualarían las toneladas anuales transportadas en ambos modos.

El reparto modal de la carga terrestre que resulta de las matrices OD aparece en la figura 4.3; es del 82% para el transporte carretero y del 18% para el ferroviario.

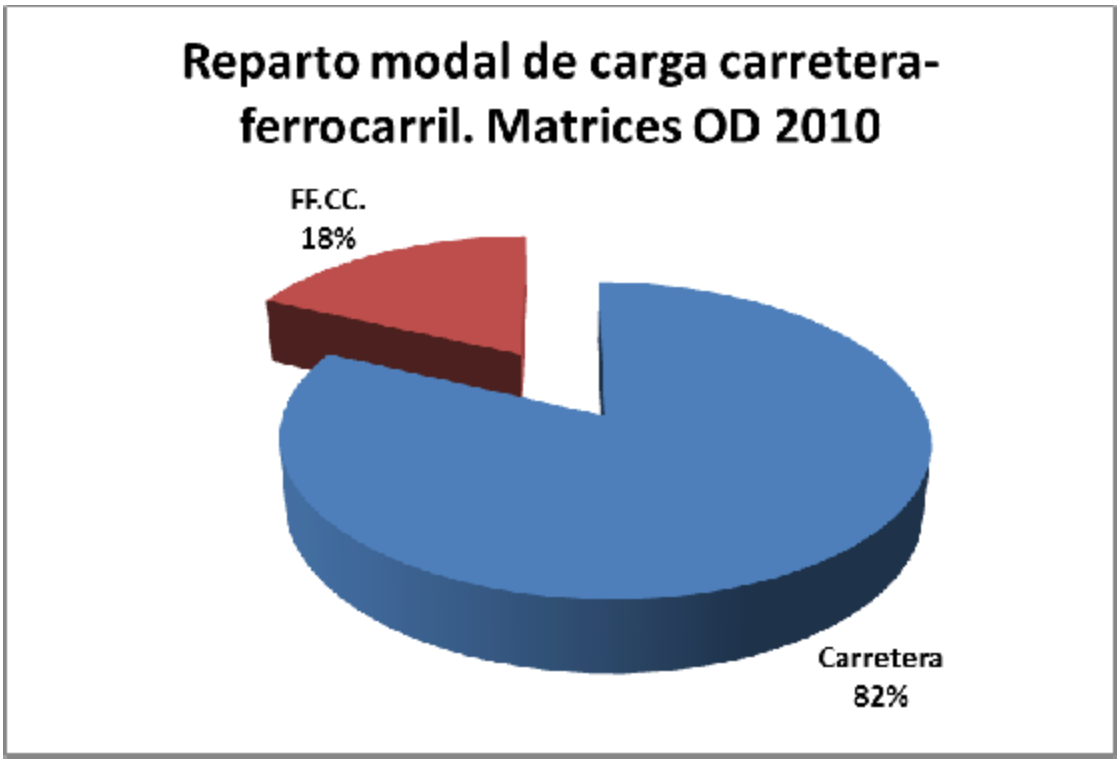


Figura 4.3. Reparto modal de carga según matrices OD de 2010 (elaboración propia).

4.4 Cálculo del costo de operación

Para llevar a cabo el reparto de carga a través del costo, se utilizaron parámetros básicos para el cálculo del costo de operación para cada modo. Estos costos de operación fueron diferenciados por tipo de terreno: plano, lomerío y montaña. De acuerdo con Arroyo, et al (2010), los costos de operación de un vehículo T3S3 son:

Vehículo	Plano	Lomerío	Montaña	Unidades
T3S3	16.59	20.82	25.62	$/veh-km

En el caso del transporte ferroviario, también se utilizaron los parámetros básicos del transporte carretero para el cálculo del costo de operación. De acuerdo con Centeno A. y Mendoza (2003), los costos de operación de un tren de 22 carros es de 13.37, 22.62 y 33.41 USD/tren-km para terreno plano, lomerío y montaña respectivamente.

Tomando en cuenta que a finales del año 2010 el USD equivalía a 13.152 pesos mexicanos y que el tren mueve 22 carros, para encontrar el equivalente a las unidades motoras del transporte carretero se multiplicó el costo de operación en

ferrocarril por el equivalente en pesos mexicanos y se dividió entre los 22 carros; obteniendo los siguientes costos de operación:

Vehículo	Plano	Lomerío	Montaña	Unidades
FFCC	7.99	13.52	19.97	$/carro-km

4.5 El proceso de modelación

Como primera etapa, y para tener un panorama general de la distribución espacial de los viajes, se graficaron las líneas de deseo de cada tipo de carga en cada uno de los modos de transporte. Estas líneas de deseo aparecen en la figura 4.4.

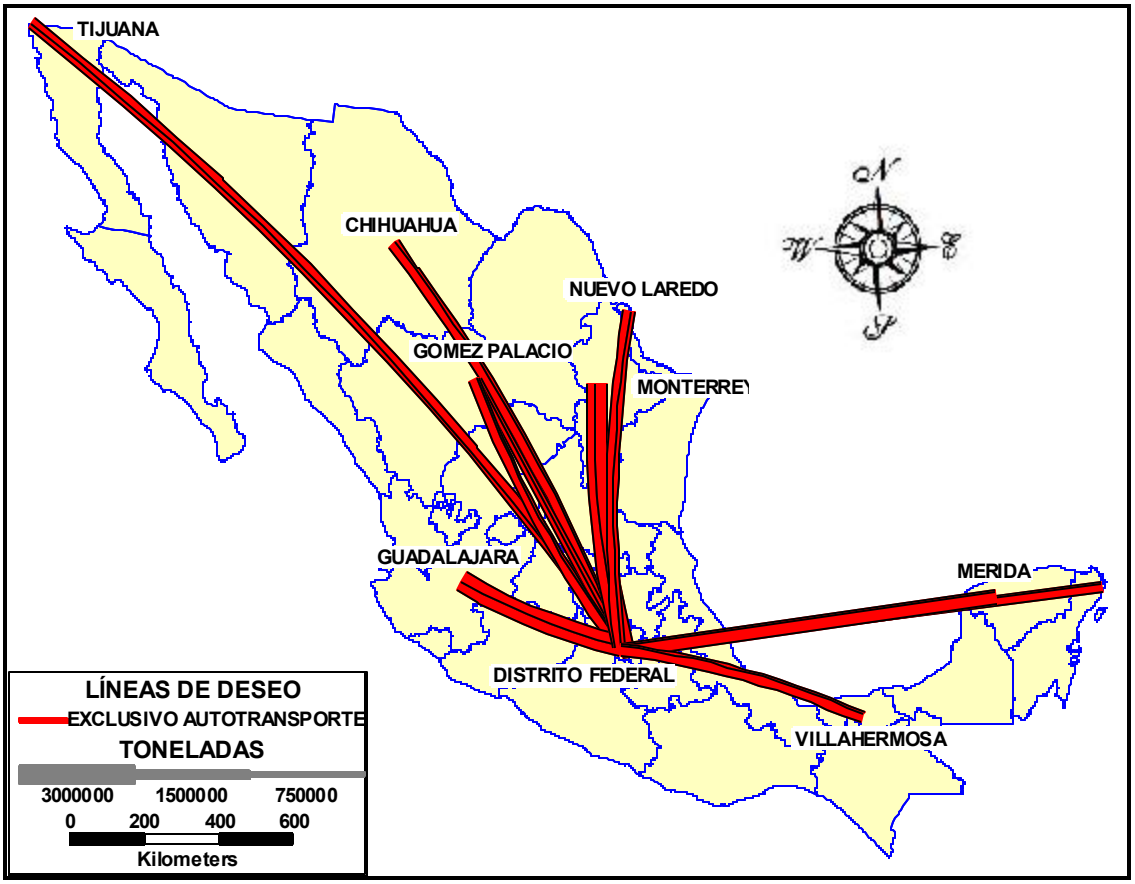


Figura 4.4. Distribución geográfica de los principales pares OD expresados en toneladas de productos que se trasladan exclusivamente por carretera. (Fuente: elaboración propia con datos de la SCT).

Respecto de las cargas del autotransporte que son susceptibles de moverse en contenedor, la figura 4.5 muestra las líneas de deseo para los principales orígenes y destinos.

Figura 4.5. Distribución geográfica de los principales pares OD expresados en toneladas de productos movidos por carretera, susceptibles de mover en contenedor. (**Fuente: elaboración propia con datos de la SCT**).

Del mismo modo, los movimientos ferroviarios que mueven contenedores aparecen en las líneas de deseo de la figura 4.6, enseguida.

Figura 4.6. Distribución geográfica de los principales pares OD expresados en toneladas de productos ferroviarios y que son trasladados en contenedores. (Fuente: elaboración propia con datos de la SCT).

La segunda etapa del proceso de modelación consistió en establecer las restricciones, definidas en párrafos anteriores, para llevar a cabo el modelo de asignación. Para cumplir con la primera hipótesis de restricción, se calculó y definió -en la tabla de atributos de la red- la capacidad, la distancia, velocidad y costo respectivamente para cada arco y para cada modo. De esta manera se aseguró que la red contenía datos cercanos a la realidad, no contenía valores iguales a cero o negativos y por lo tanto, que durante el proceso de asignación de tráfico TransCAD podrá encontrar la ruta más corta entre los pares OD en términos de tiempo o costo de operación.

Para satisfacer la segunda, tercera y cuarta hipótesis de restricción, se generaron conjuntos de arcos denominados "RCF" y "FFCC" que significan Red Carretera Federal y Ferrocarril respectivamente. Al momento de asignar las toneladas de un producto que solamente puede ser transportado por carretera, se le indica al software TransCAD que restringa el paso de estas toneladas hacia el conjunto denominado "FFCC".

La tercera etapa para realizar la modelación fue comprobada mediante la conectividad de la red.

La cuarta etapa del modelo de asignación consiste en definir los escenarios y el tipo de modelo de asignación por utilizar. Los escenarios por modelar fueron:

- Asignación de toneladas de ferrocarril exclusivamente por modo ferroviario, con base en el tiempo de viaje por arco.
- Asignación de toneladas de autotransporte exclusivamente por modo carretero, con base en el tiempo de viaje por arco.
- Asignación de toneladas de ferrocarril y autotransporte por modo ferroviario y carretero, sin intercambio de flujo de mercancías, con base en el tiempo de viaje por arco.
- Asignación de toneladas de ferrocarril y autotransporte por modo ferroviario y carretero, con intercambio de flujo de mercancías, con base en el tiempo de viaje por arco.
- Asignación de toneladas de ferrocarril exclusivamente por modo ferroviario, con base en el costo de operación por arco.
- Asignación de toneladas de autotransporte exclusivamente por modo carretero, con base en el costo de operación por arco.
- Asignación de toneladas de ferrocarril y autotransporte por modo ferroviario y carretero, sin intercambio de flujo de mercancías, con base en el costo de operación por arco.
- Asignación de toneladas de ferrocarril y autotransporte por modo ferroviario y carretero, con intercambio de flujo de mercancías, con base en el costo de operación por arco.

Finalmente -dadas las restricciones del modelo y la clasificación de la matriz OD, por tipo de producto- se estableció como el más adecuado para la modelación, el modelo multimodo-multiclase disponible en el software TransCAD; por permitir la asignación de diversas matrices OD, así como la restricción de paso de uno o varios pares OD a través de un conjunto de arcos.

4.6 La asignación multimodal

Las características socio-económicas de las zonas y las de los flujos de transporte que llegan o salen a ellas están relacionadas. Estas relaciones permiten estimar flujos futuros, dadas las condiciones socio-económicas esperadas de las zonas y de la infraestructura.

En el contexto del paradigma de cuatro etapas de la planeación del transporte, ya que en este trabajo se obtuvo una matriz O-D de flujos de carga para los modos de transporte carretero y ferroviario, se pueden considerar cubiertas las etapas de generación de viajes y su distribución.

En este proyecto, se asignan flujos de carga en función de las características de los arcos de la red de transporte. Las redes de transporte ferroviario y carretero, al estar vinculadas en los puntos de transferencia, permiten integrar una red con arcos para cada modo de transporte. Así, durante la asignación de flujos a arcos se selecciona al mismo tiempo el modo de transporte, por lo que el reparto modal se realiza en forma implícita durante la etapa de asignación.

La importancia del modelo de asignación radica en que de este modelo se obtendrá información del flujo que sigue la mejor ruta entre cada par OD. El modelo utiliza como dato de entrada una matriz OD, con los datos de los viajes y los asigna a la red.

Sin embargo, aunque no se tenía una matriz OD a detalle para las zonas de estudio y los pares OD por analizar, fue posible usar los aforos de tránsito como dato base para estimar dichas matrices; razón por la cual se realizó una búsqueda bibliográfica de los métodos más utilizados para la estimación de matrices OD a través de conteos.

De la búsqueda bibliográfica, se encontraron diversos artículos que han estudiado y aplicado metodologías para reducir el costo de la estimación de matrices OD. Algunos de estos trabajos son: Robillard (1975); Turnquist and Gur (1979); Van Zuylen y Willumsen (1980); Hendrickson y Siddarthan (1981); Maher(1983); Bell (1983, 1991); Cascetta (1984); McNeil y Hendrickson (1985); Spiess (1987); Cascetta y Nguyen (1988); Brenninger-Göthe *et al.* (1989); Fisk (1989); Yang *et al.* (1991); Nihan y Hamed (1992); Kawakami *et al.* (1992); Nielsen (1993, 1998); Denault (1994); Lo *et al.* (1996, 1999); Hazelton (2000), Iannó y Postorino (2002); y Friedrich y Wang (2004, 2005).

Esta estimación de matrices OD surge a través del estudio de la relación entre la distribución de los pares OD y los conteos de vehículos en los arcos de la red. Los conteos son modelados como variables estocásticas, medidas con algún error y quizá inconsistentes con la conservación de flujo.

Uno de los métodos más utilizados para la estimación de una matriz OD es el de Nielsen (1998); que trata las variables de conteo como estocásticas y puede usar cualquier método de asignación. Este método fue implementado por TransCAD y en la práctica parece trabajar muy bien, de tal forma que muchos usuarios han reportado buenos resultados con su uso (Caliper, 2014). Usando el método de Nielsen, se realizó el proceso de asignación de tránsito multimodal, en dos partes: la primera consiste en la calibración de la matriz y la segunda en el modelo de asignación en cada una de las redes.

Una vez calibrada la matriz OD y verificado, a través de las líneas de deseo, que los pares OD son coherentes con lo reportado por la SCT; y agregadas las restricciones al mapa, se realizaron las asignaciones del modelo a través del atributo de tiempo y posteriormente con el costo de operación como indicadores para la elección de la ruta a seguir por parte de los transportistas.

Las asignaciones de tránsito para los modos carretero y ferroviario fueron realizadas por separado para analizar la coherencia de los datos con los movimientos reportados por la SCT como muestran las figuras 4.7 y 4.8.

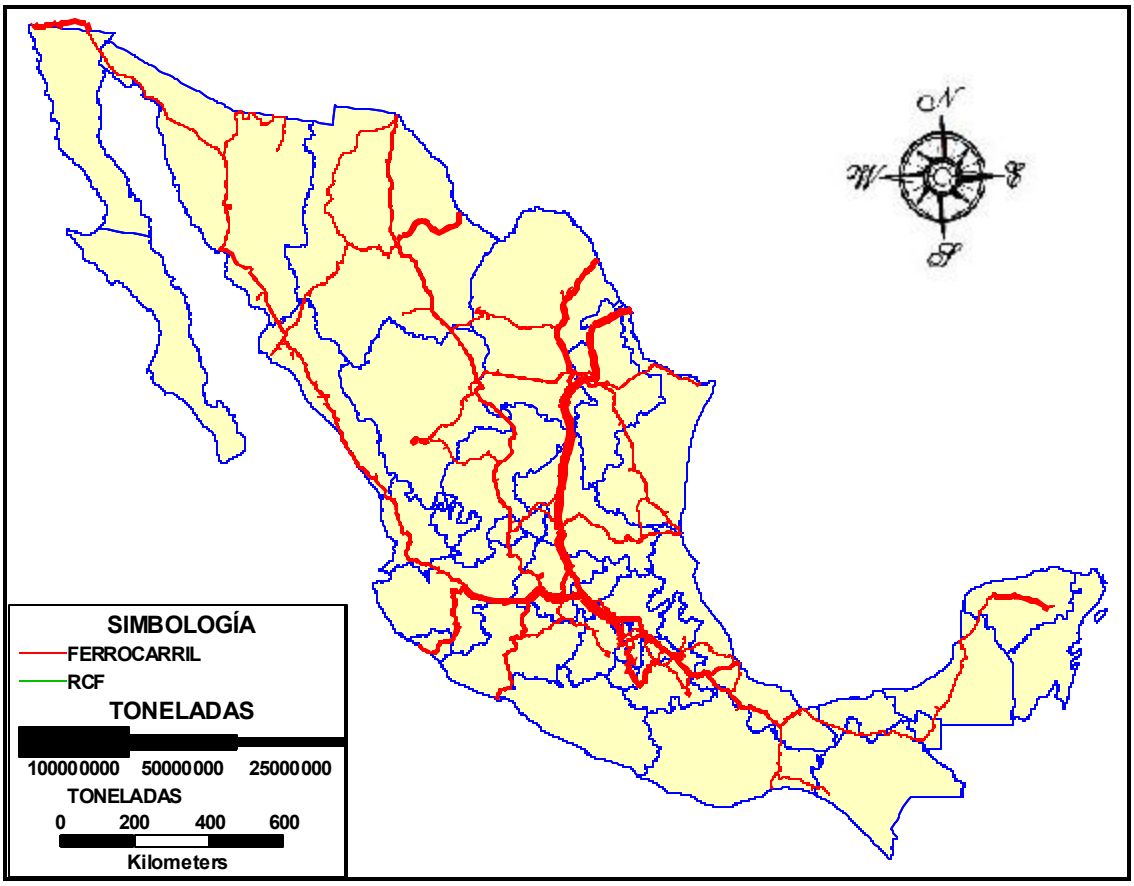


Figura 4.7. Asignación de toneladas exclusivamente por modo ferroviario con base en el tiempo de viaje por arco. (Fuente: elaboración propia).

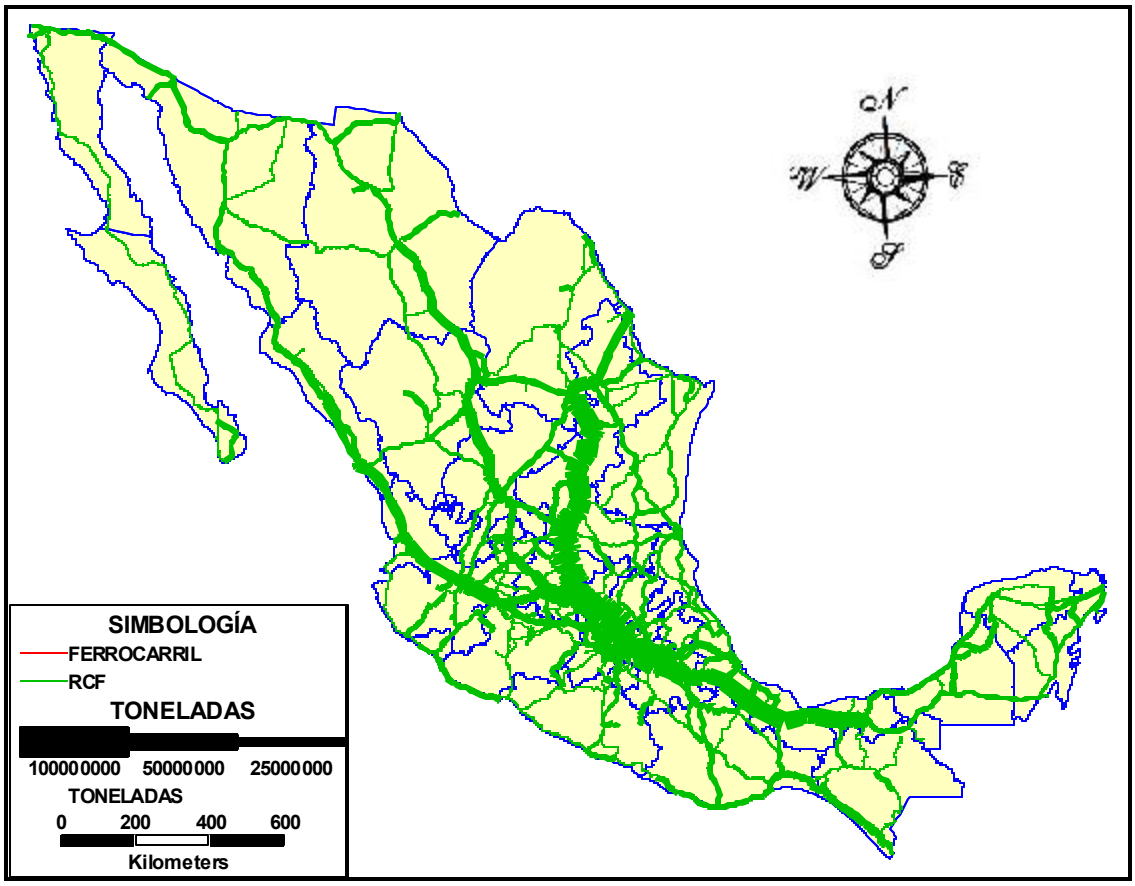


Figura 4.8. Asignación de toneladas exclusivamente por modo carretero con base en el tiempo de viaje por arco. (Fuente: elaboración propia).

Al mostrar coherencia con los datos de la SCT, se procedió a realizar la asignación de las toneladas totales sin y con intercambio entre los dos modos.

Para verificar la validez del modelo, se inició considerando la selección de rutas solamente con base en el tiempo de viaje entre origen y destino. Los resultados aparecen en las figuras 4.9 y 4.10, a continuación.

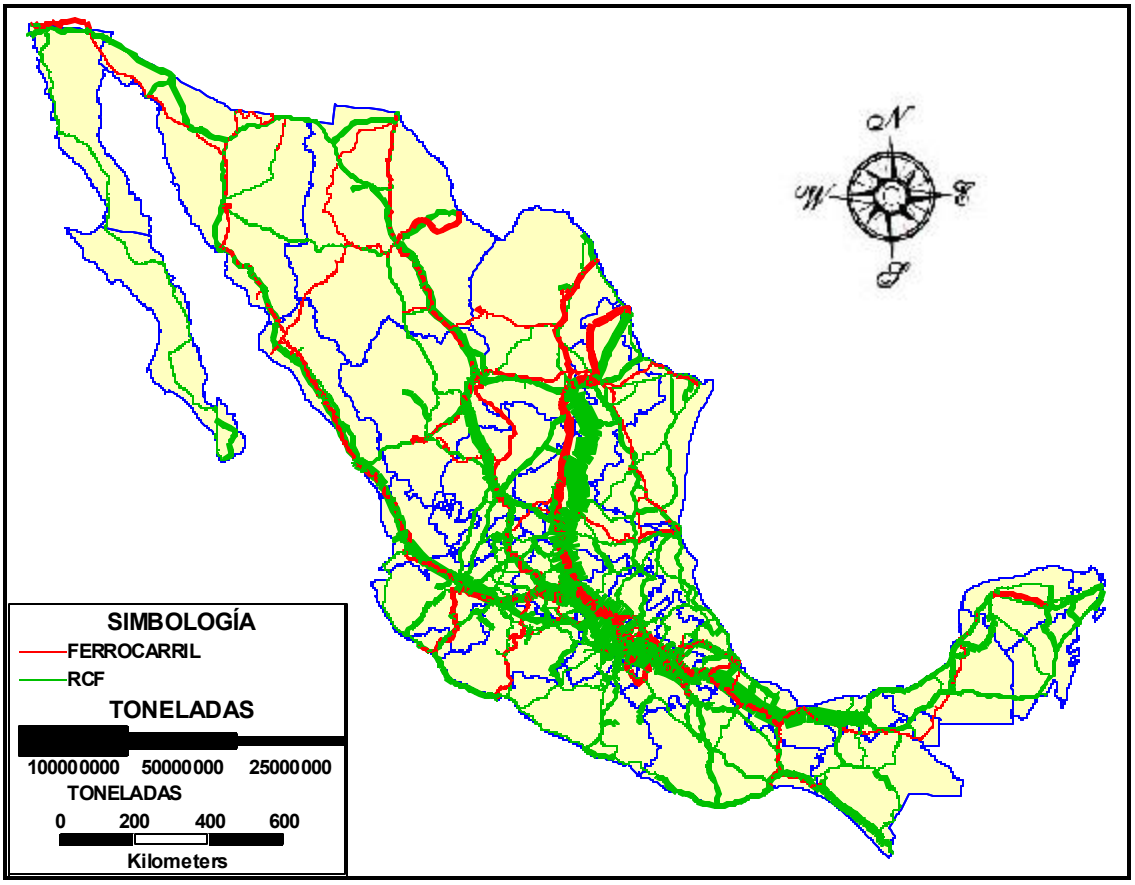


Figura 4.9. Asignación de toneladas de ferrocarril y autotransporte por modo ferroviario y carretero, sin intercambio de flujo de mercancías, con base en el tiempo de viaje por arco. (Fuente: elaboración propia).

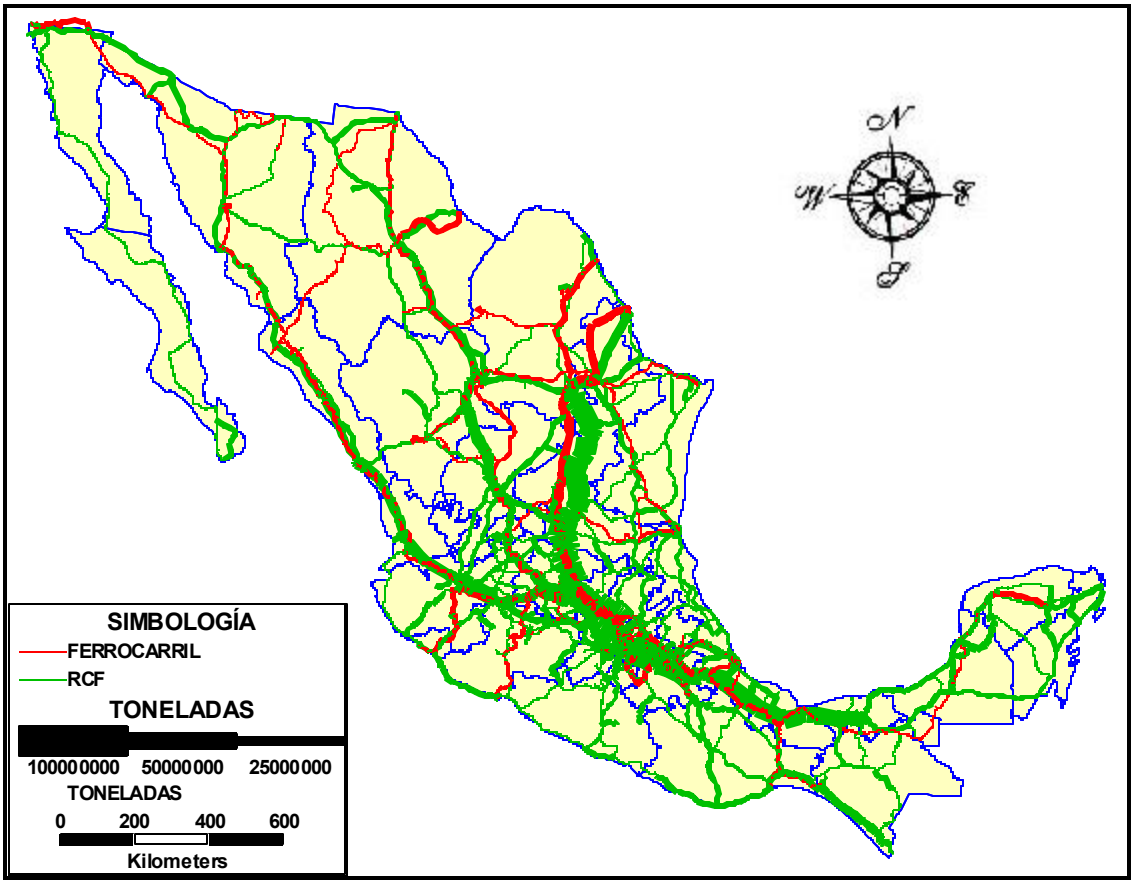


Figura 4.10. Asignación de toneladas de ferrocarril y autotransporte por modo ferroviario y carretero, con intercambio de flujo de mercancías, con base en el tiempo de viaje por arco. (Fuente: elaboración propia).

Con la condición de permitir el paso de un modo a otro, basándonos en el tiempo de recorrido de cada arco, el modelo mostró el comportamiento esperado; con un efecto que disminuye la carga asignada por el ferrocarril y se asigna a los tramos carreteros.

Esto se debe a que el tiempo de recorrido es menor en el modo carretero que en el ferroviario. Sin embargo, el efecto de congestión característico de la red carretera no permite que la carga ferroviaria sea trasladada en su totalidad, como se puede apreciar en las gráficas resumen de los corredores Manzanillo-Pantaco, México-Nuevo Laredo y México-Veracruz que muestran las figuras 4.11, 4.12 y 4.13.

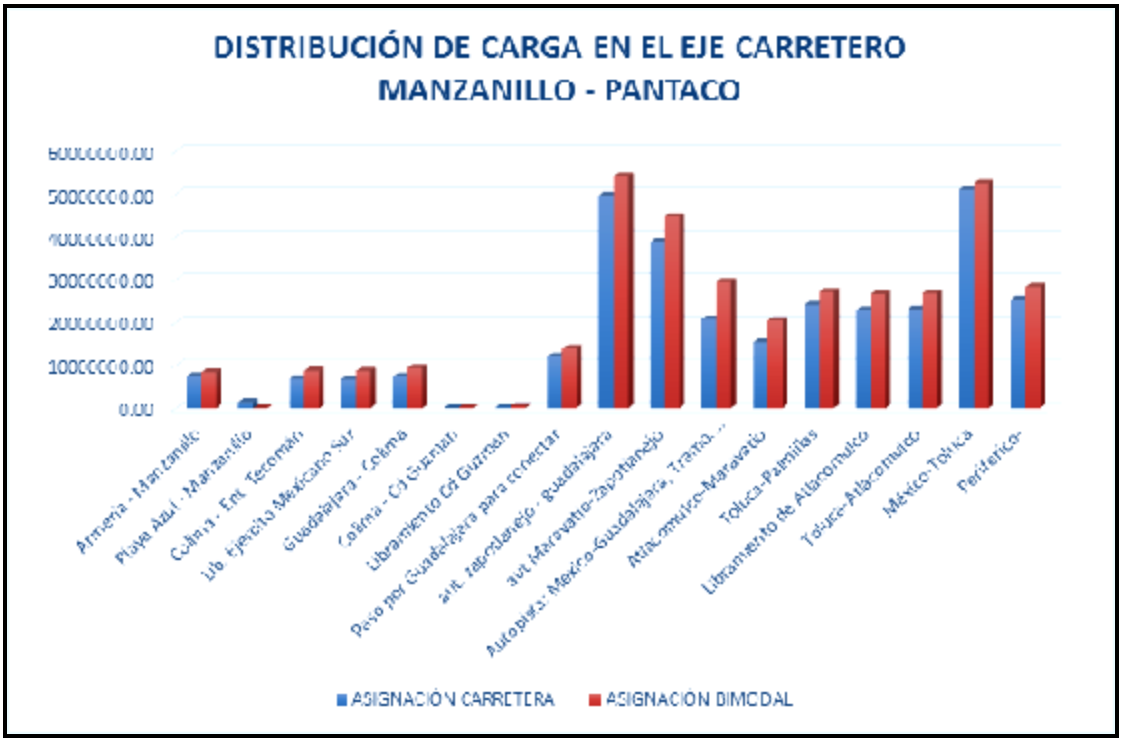


Figura 4.11. Distribución de carga. Eje carretero Manzanillo-Pantaco. (Fuente: elaboración propia).

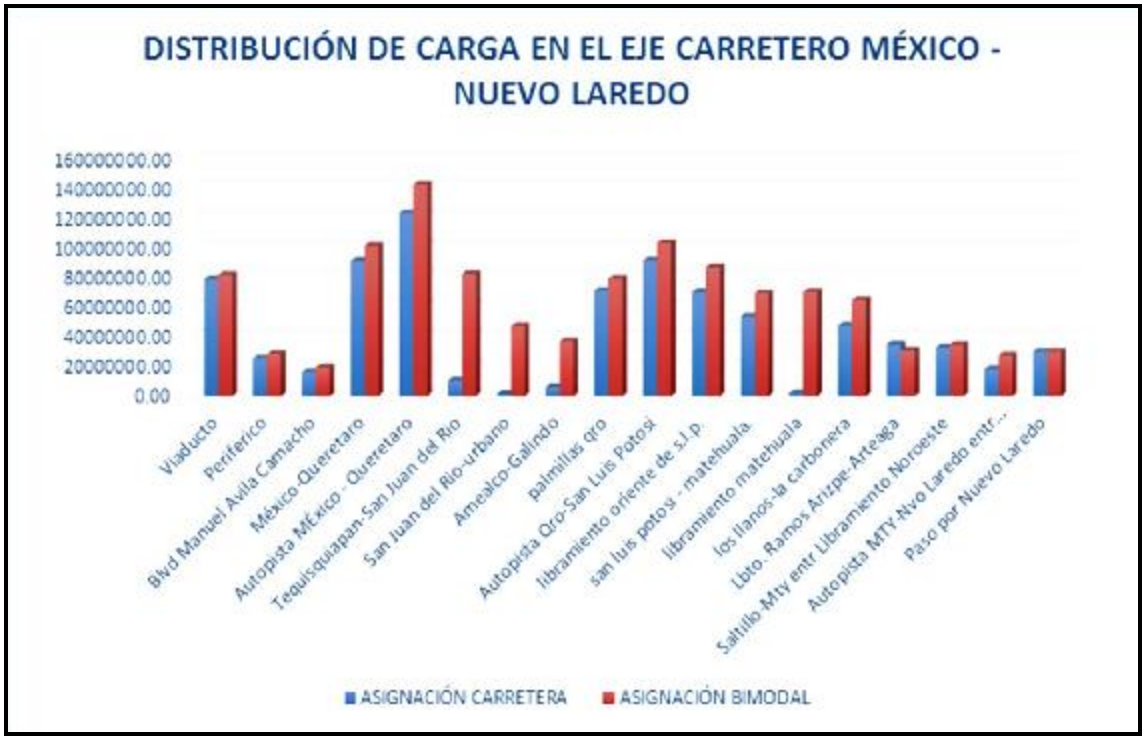


Figura 4.12. Distribución de carga. Eje carretero México-Nuevo Laredo. (Fuente: elaboración propia).

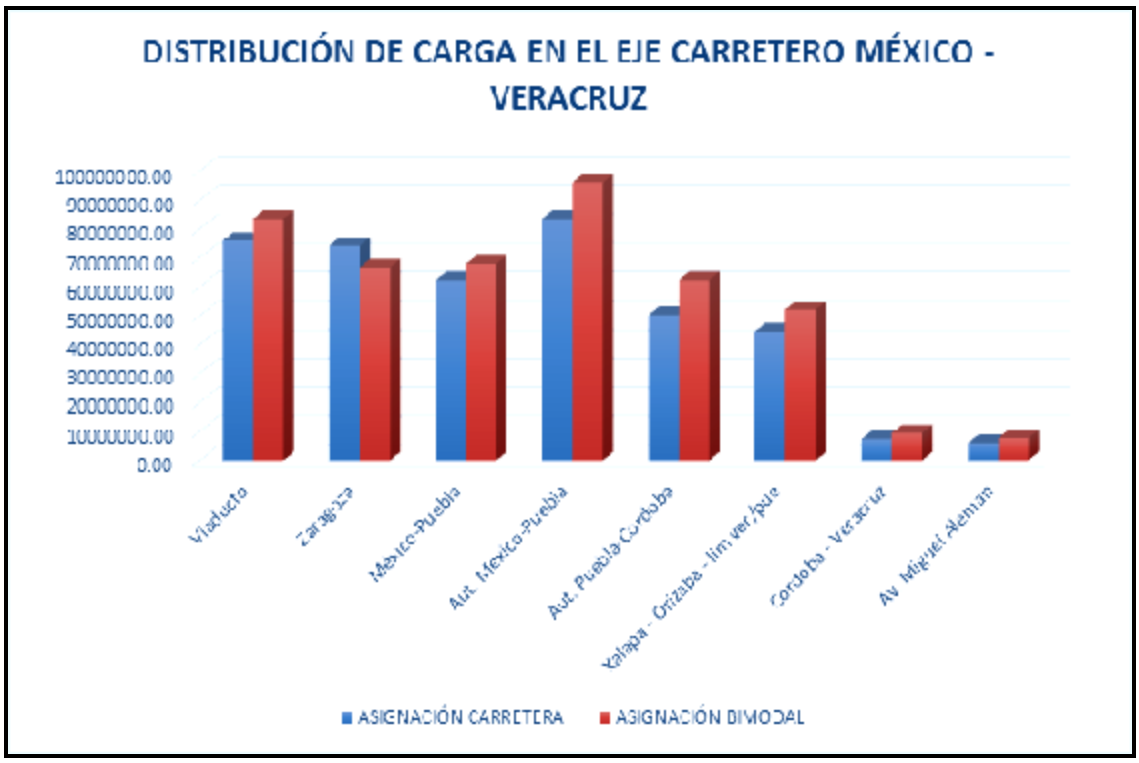


Figura 4.13. Gráfica representativa de la distribución de carga en el eje carretero México-Veracruz. (Fuente: elaboración propia).

Una vez verificada la validez del modelo, con la respuesta, considerando sólo el tiempo de viaje entre orígenes y destinos; se procedió a hacer corridas que incluían los costos de operación de los dos modos.

Las figuras 4.14 y 4.15 muestran los flujos resultantes, considerando el costo de operación de los dos modos separadamente.

En la figura 4.16 aparecen los flujos resultantes, considerando el costo operativo de los dos modos, sin permitir intercambio entre ellos.

La figura 4.17 muestra el resultado incluyendo los costos operativos de los modos, pero al permitir la transferencia de carga entre ellos.

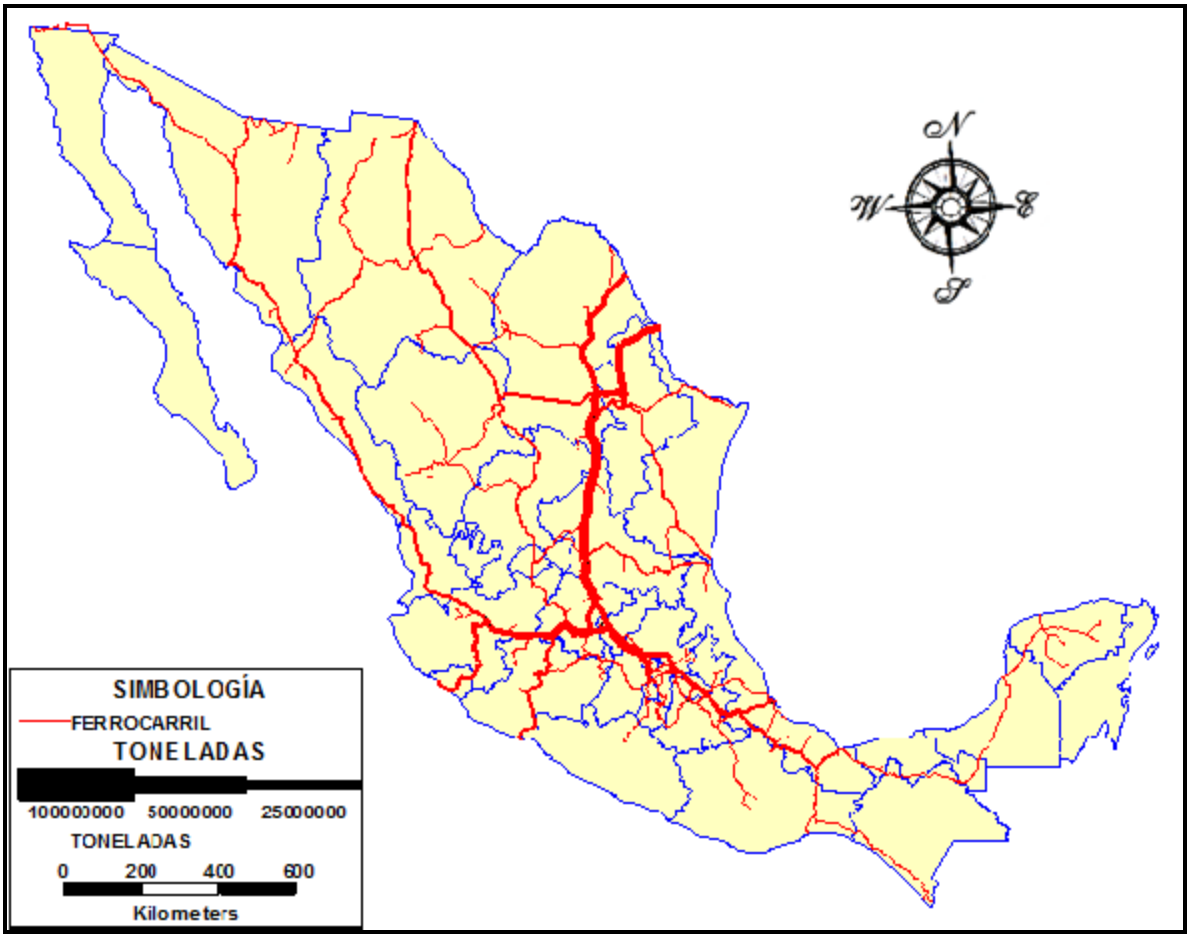


Figura 4.14. Asignación de toneladas de carga exclusivamente por modo ferroviario con base en el costo de operación por arco. (Fuente: elaboración propia).

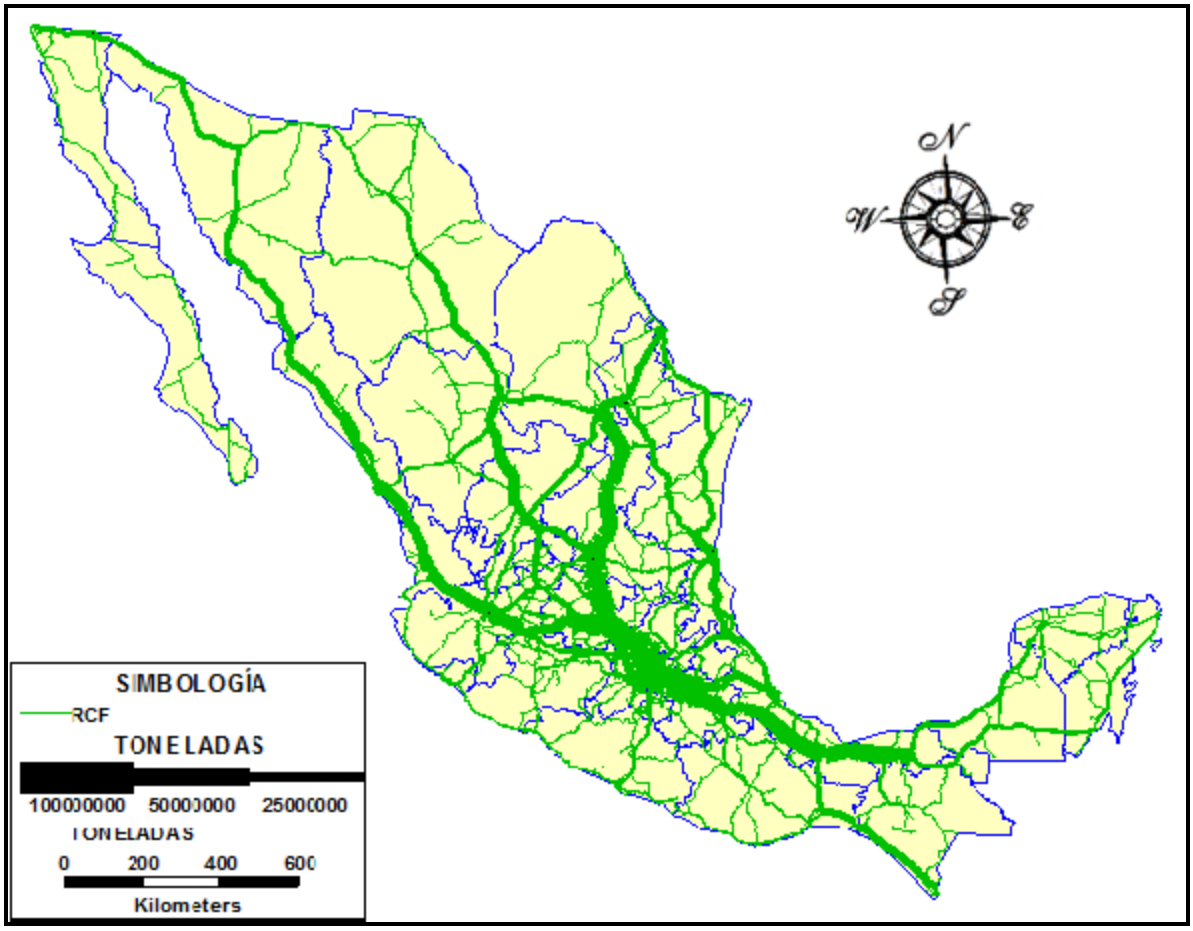


Figura 4.15. Asignación de toneladas de carga exclusivamente por modo carretero con base en el costo de operación por arco. (Fuente: elaboración propia).

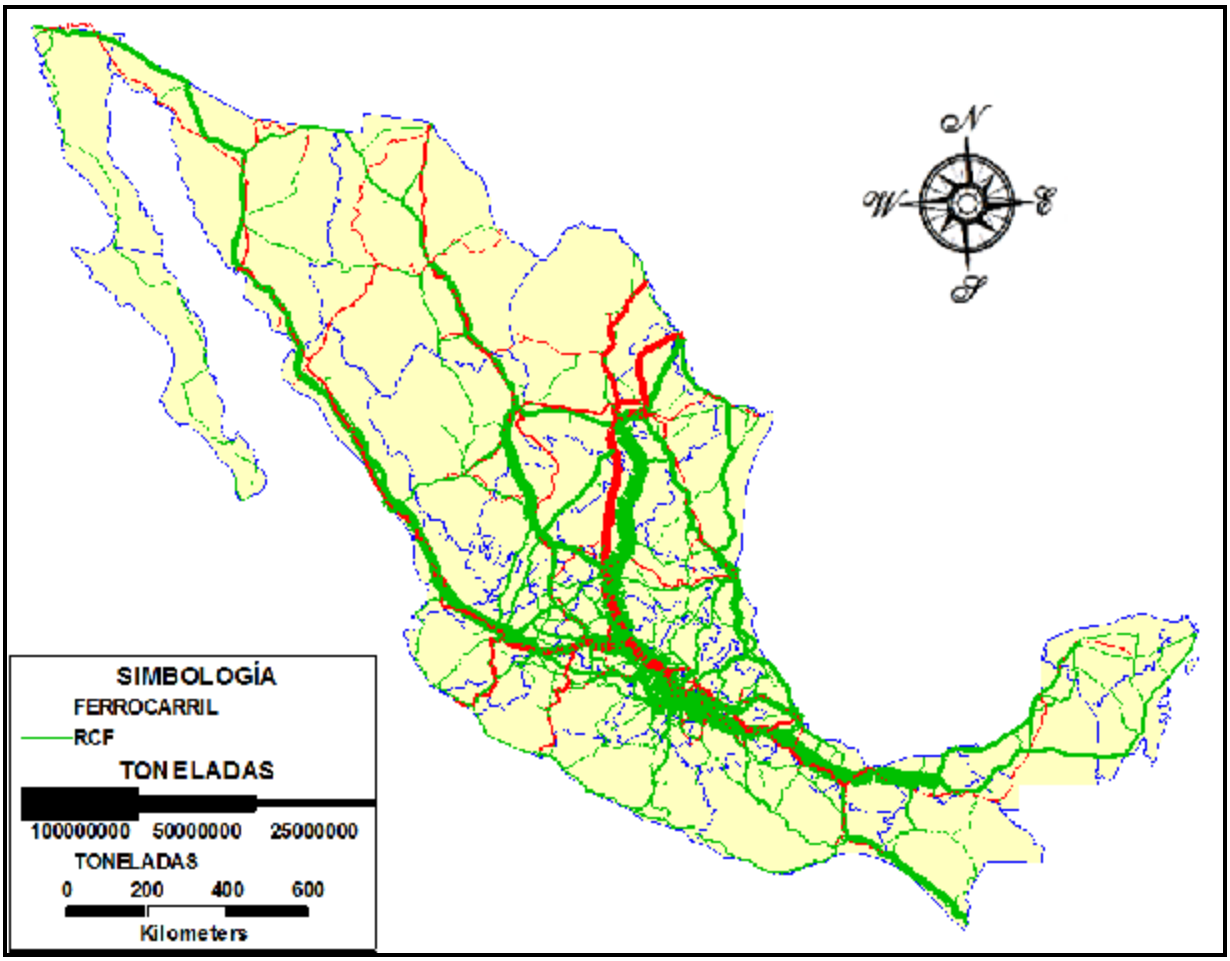


Figura 4.16. Asignación de toneladas de carga por modo ferroviario y carretero, sin intercambio de flujos con base en el costo de operación por arco. (Fuente: elaboración propia).

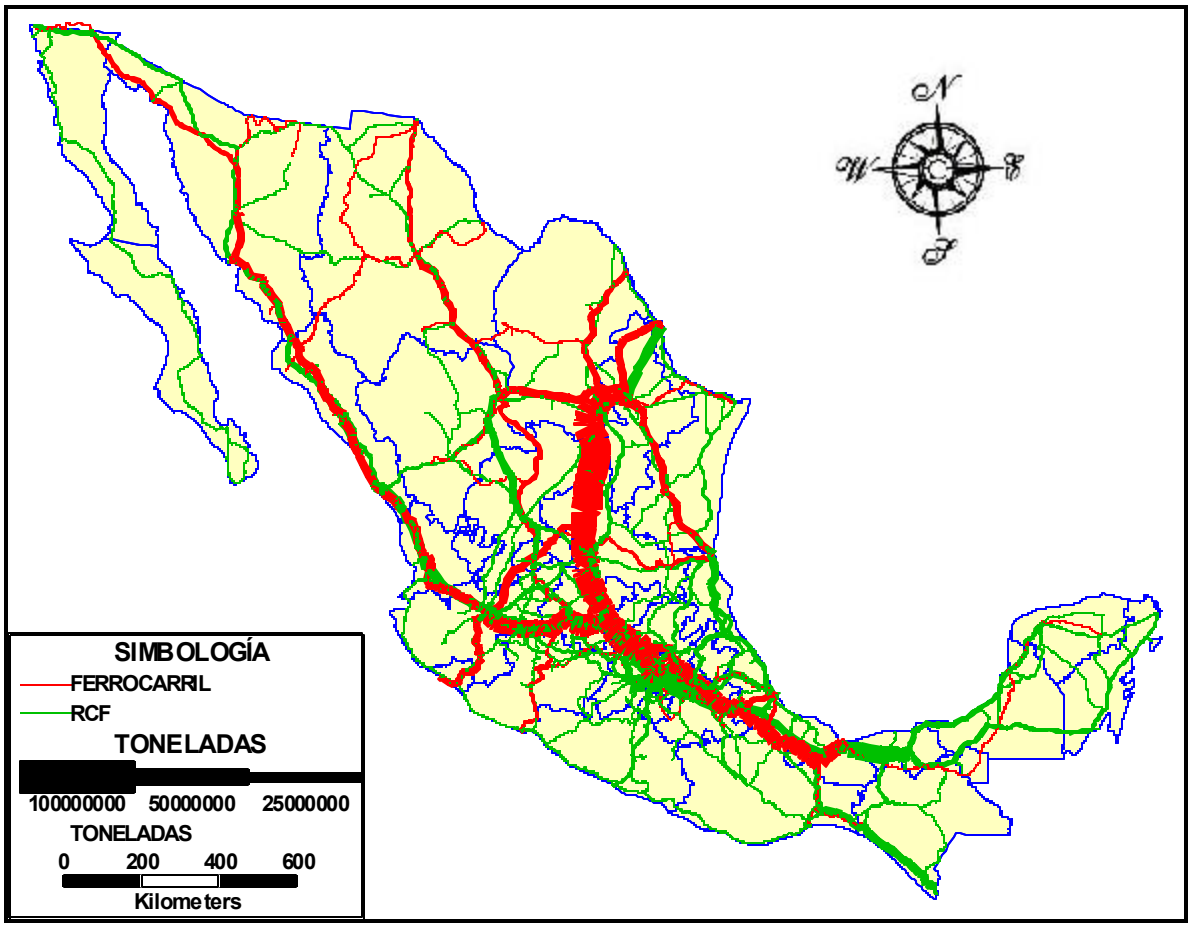


Figura 4.17. Asignación de toneladas de carga por modo ferroviario y carretero, con intercambio de flujo de mercancías, con base en el costo de operación por arco. (Fuente: elaboración propia).

Luego de comparar las figuras 4.16 y 4.17, se puede apreciar cómo la carga ferroviaria se incrementa, en comparación al escenario donde no existe intercambio de mercancías considerando el costo de operación como indicador para la elección de la ruta a seguir entre cada par OD en cada modo.

Debido a que el modelo no toma en cuenta el efecto del congestionamiento para el modo ferroviario, la cantidad de pares OD que cambia de modo es mayor en comparación al escenario donde el tiempo es el indicador para elegir la ruta más corta.

Los efectos de la transferencia de carga del ferrocarril a la carretera aparecen claramente en los casos de los corredores Manzanillo-Pantaco, México-Nuevo Laredo y México-Veracruz, como se puede observar en las figuras 4.18 a 4.20 que vemos enseguida.

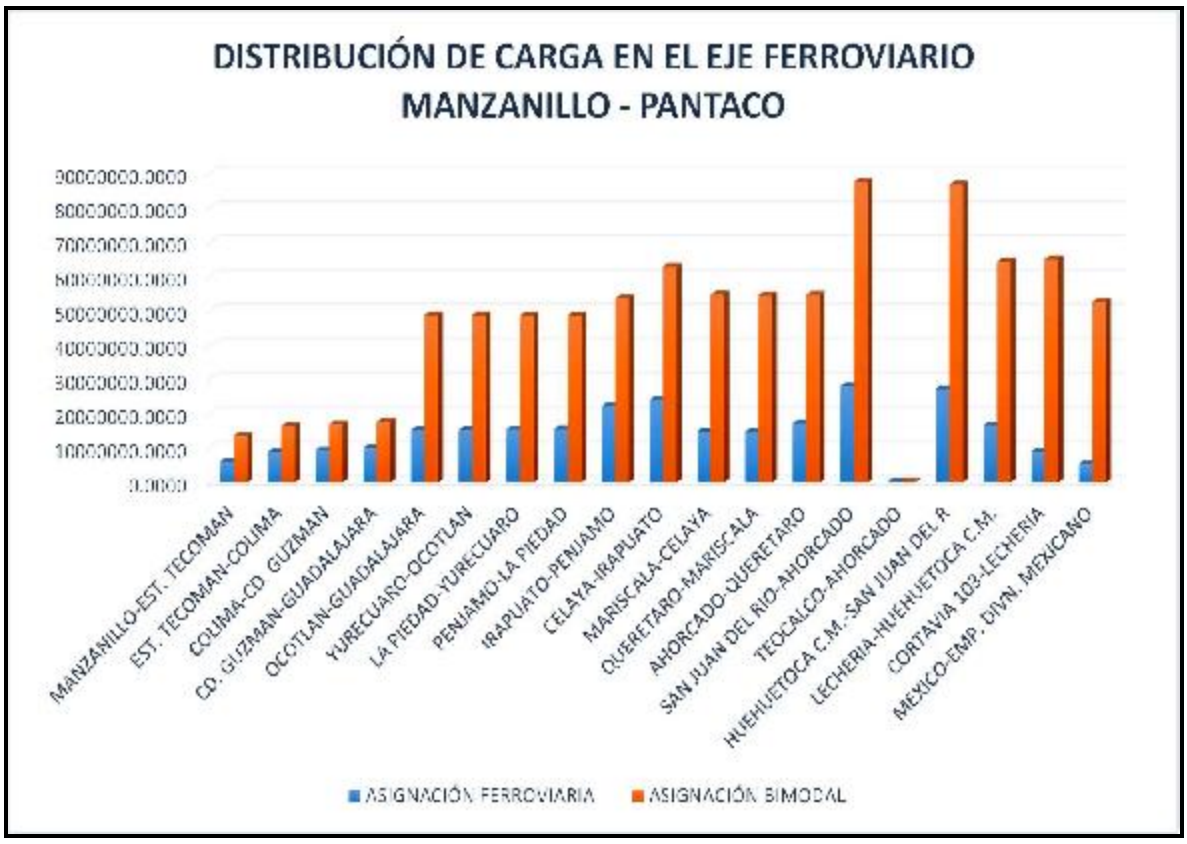


Figura 4.18. Gráfica representativa de la distribución de carga en el eje ferroviario Manzanillo-Pantaco. (Fuente: elaboración propia).

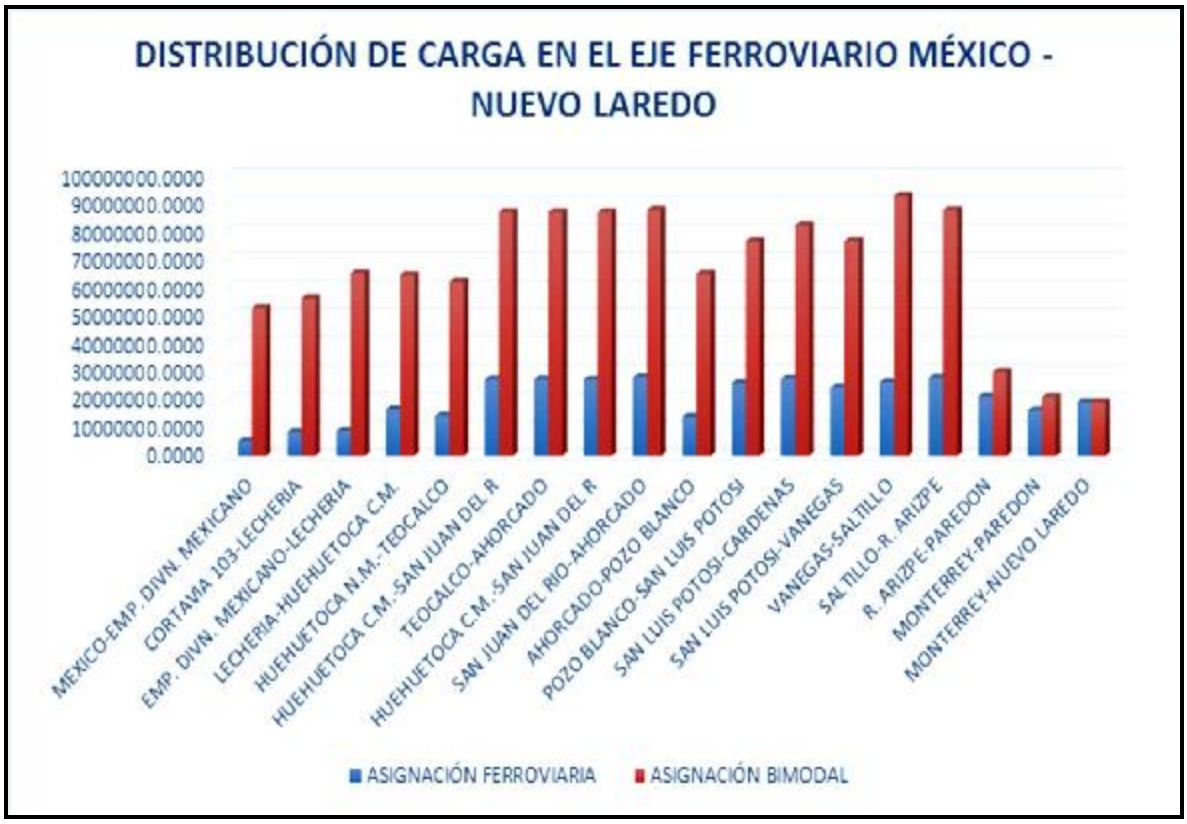


Figura 4.19. Gráfica representativa de la distribución de carga en el eje ferroviario México-Nuevo Laredo. (Fuente: elaboración propia).

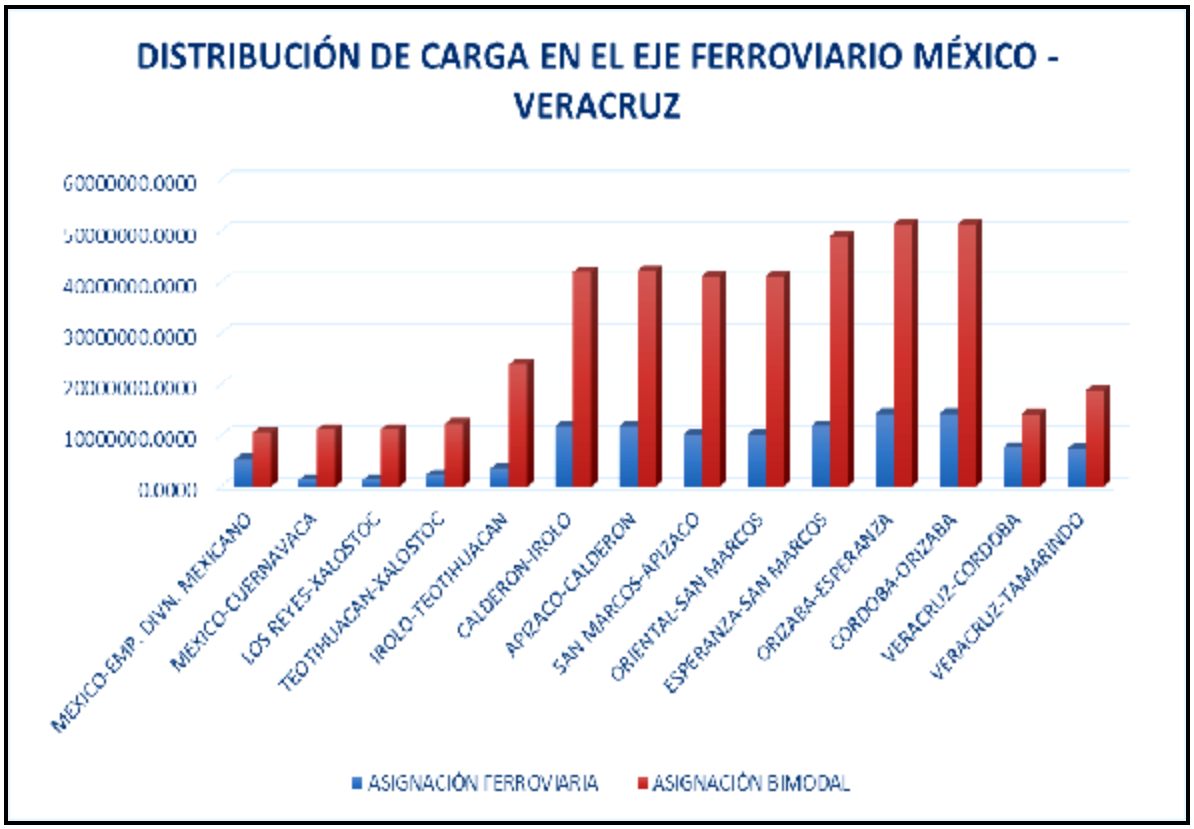


Figura 4.18. Gráfica representativa de la distribución de carga en el eje ferroviario México-Veracruz. (Fuente: elaboración propia).

Los resultados del modelo, al considerar tiempos de recorrido y costos operativos de los dos modos, parecen consistentes con la condición actual del sistema ferroviario; el que compite por cargas con el autotransporte y ha mostrado una tendencia general creciente en los últimos años, como se comentó en la sección 2.1 de este documento.

El porcentaje estimado de transferencia de carga que es movido por carretera y que podría ser transportado por ferrocarril es de casi 40%. Esta carga potencial requiere un tratamiento más detallado a través de un análisis de sensibilidad para evaluar e identificar las variables que son más sensibles para el embarcador o el transportista, para la elección de un modo u otro.

A través de la obtención de datos más precisos sobre los costos operativos de los modos, así como de otras variables que pudieran incorporarse al análisis -como las velocidades medias en el sistema ferroviario, o las longitudes de los trenes- se podrán mejorar las estimaciones de este modelo y sus pronósticos.

Este proyecto continuará con análisis más detallados en una segunda etapa, en la que se buscarán mejoras al modelo, a la obtención de datos y a las actualizaciones necesarias para acercarse a los años más recientes de operación del sistema de transporte terrestre.

5 Conclusiones

El reparto modal del transporte terrestre de carga es un aspecto relevante de la planeación sectorial que busca la combinación de los modos que resulte con la mayor eficiencia posible en cuanto a costos operativos y consumo de combustible.

Las razones técnicas que explican la mayor eficiencia del ferrocarril no son suficientes para lograr que ciertas clases de productos emigren del movimiento carretero al ferroviario, ya que existen razones de tipo operativo, económico y logístico que determinan la elección de modo de transporte por parte de los usuarios.

La exploración de los antecedentes del reparto modal, sus aspectos técnicos, económicos y logísticos son el primer paso para tener un panorama claro que guíe la selección de medidas de aliento para la transferencia de carga al ferrocarril.

La modelación de la red terrestre de carga, considerada como una red bimodal con una parte correspondiente al movimiento carretero y otra al ferroviario, permite observar las posibilidades del movimiento de carga terrestre, variando diversos parámetros que pueden representar las decisiones racionales que toman los embarcadores.

Parte fundamental para el éxito de la modelación es el tener datos de la red bimodal, así como datos operativos de los modos, estimaciones de costos operativos de ambos modos y estimaciones de las matrices origen-destino, que sean suficientemente confiables.

En este trabajo se lograron algunas aproximaciones de los movimientos de ambos modos, empleando procesos de ajuste y estimaciones de matrices origen-destino; así como de costos operativos para los dos modos empleando datos publicados en estudios previos y siguiendo el Índice Nacional de Precios al Productor para el transporte ferroviario; mientras que se aprovecharon datos de aforos vehiculares publicados por la SCT para ajustar la matriz origen destino del movimiento carretero.

Las primeras corridas del modelo han mostrado buena congruencia de los resultados con los supuestos y los hechos conocidos de la red terrestre; y permitirán, en una segunda etapa, continuar con refinamientos de datos y parámetros de modelación que mejorarán los resultados obtenidos.

Una vez construido el modelo de reparto modal terrestre de carga, se está en la posibilidad de analizar diversos casos específicos y elaborar pronósticos con base en modificaciones que puedan ocurrir en la red, o las condiciones operativas de los modos de transporte.

El valor del modelo como herramienta de análisis es muy significativo en las tareas de planeación y en la toma de decisiones realizadas en la SCT.

La evaluación de la elección de la ruta en términos del tiempo de viaje muestra un incremento promedio en la carga asignada al modo carretero del 10.4% lo cual incrementa el congestionamiento vial en los principales ejes carreteros del país.

La evaluación de la elección de la ruta en términos del costo de operación muestra una preferencia del uso del ferrocarril del 272.7% promedio por tramo ferroviario.

La comparación entre el modelo de asignación bimodal con base en el tiempo de viaje y el costo de operación muestra que existe una saturación en la red carretera; lo que permitirá un cambio menor hacia el modo carretero en comparación con la carga potencial que usaría el ferrocarril si sólo se toma en cuenta el costo de operación.

El modelo muestra un beneficio mayor si se lograra trasladar la carga carretera al ferrocarril; sin embargo, esto requerirá evaluar a través, de un análisis de sensibilidad las variables a las que es más sensible el modelo para la elección de la ruta por modo.

Bibliografía

Ballou, Ronald H. (1992). *Business Logistics Management.* Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall Inc.

Barkan, C. (2007). *Railroad Transportation Energy Efficiency.*Illinois Railroad Engineering Program. Disponible en: http://www.istc.illinois.edu/about/SeminarPresentations/20091118.pdf

Bell, G., Bowen, P. y Fawcett, P. (1984). *The Business of Transport.* Estover, Plymouth, U.K. : Macdonald & Evans Ltd.

Bell, G.J., Blackledge, D.A. y Bowen, P.J. (1983). *The Economics and Planning of Transport.* London, U.K. : William Heinemann Ltd.

Brogan, J.J.; Aeppli, A.E.; Beagan, D.F; Brown, A.; Fischer, M.J.; Grenzeback, L.R.; McKenzie, E.; Vimmerstedt, L.; Vyas, A.D.; Witzke, E.; (March 2013)." Freight Transportation Modal Shares: Scenarios for a Low-Carbon Future ". *Transportation Energy Futures Series*. Prepared by Cambridge Systematics, Inc. (Cambridge, MA), and the National Renewable Energy Laboratory. (Golden, CO) for the U.S. Department of Energy, Washington, DC. DOE/GO-102013-3705.

Bustos Rosales A. et al. (2003). *Análisis del Potencial para el Intermodalismo en el Movimiento de Mercancías, Proyecciones 2000, 2010, 2025*. Publicación Técnica No. 235. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.

Caliper Corporation. (2007). Computer-Aided Design System for Transportation Manual for Travel Demand Modeling with TransCAD 4.8.

Centeno Saad, A.G. y Mendoza Díaz, A. (2003). *Modelo de Asignación Intermodal Multiproducto para las Operaciones de Carga por Autotransporte y Ferrocarril*. Publicación Técnica No.222. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.

DGTFM. (2013). Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal. *Anuario Estadístico Ferroviario 2012*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. México, D.F.

Gil Anaya, C.Z., Reyes Ramírez, R. y Mendoza Díaz, A. (1999). *Modelación Multiproducto de los Flujos de Carga en las Redes Carretera y Ferroviaria*. Publicación Técnica No.126. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.

Hoyle, B.S. y Knowles, R.D. (1992). *Modern Transport Geography.* London : Belhaven Press.

IMT. (2013). *Manual Estadístico del Sector Transporte 2012*. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.

INEGI. (2013). *Encuesta Anual de Transportes 2012. Datos 2011*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, D.F.

Khisty, C. Jotin. (1990). *Transportation Engineering. An Introduction.* Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall, Inc.

Lambert, Douglas M. y Stock, James R. (1993). *Strategic Logistics Management.* Boston, Ma. : Irwing / McGraw-Hill.

López Castro, M. A., Hernández García, S., y Torres Vargas, G. (2004). *Evaluación económica de las actuales condiciones de competencia y complementariedad entre ferrocarril y autotransporte*. Publicación Técnica 261, Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro.

Mendoza Díaz, A., Gil Anaya, C.Z. y Trejo Ramírez, J.M. (2000). *Un Análisis Multiproducto a través de Redes del Transporte de Carga entre México y Estados Unidos*. Publicación Técnica No.137. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.

NCHRP.(1998). *Travel Estimation Techniques for Urban Planning*. Report 365. TRB. Washington, D.C.

Nielsen, O. A. (1998). '' Two New Methods for Estimating Trip Matrices from Counts ''. *Travel Behaviour Research: Updating the State of Play*. pp. 221-250, edited by J, Ortúzar, D. Hensher y S. Jara-Díaz. Pergamon Press.

Nihan N. L. y Hamed, M. M. (1992). '' Fixed Point Approach to Estimating Freeway Origin-Destination Matrices and the Effect of Erroneous Data on Estimate Precision ''. *Transportation Research Record 1357*, 18-28.

Ortúzar, J.D. and Willumsen, I. (2011). *Modelling Transport*. 4th Edition. John Wiley and Sons, Ltd. Chichester, UK.

Papacostas, C.S. y Prevedourus, P.D. (1993). *Transportation Engineering and Planning*. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall, Inc.

Ratcliffe, Brian. (1987). *Economy and Efficiency in Transport and Distribution*. London, U.K. : Kogan Page Ltd.

Rico Rodríguez, A. et al. (1995). *Un Análisis de Reparto Modal de Carga entre Carretera y Ferrocarril*. Publicación Técnica No. 76. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.

Rico Rodríguez, A., Mendoza Díaz, A. y De Alba Rosano, M. (1997). *Oportunidades de Intermodalismo Carretera-Ferrocarril*. Publicación Técnica No. 95. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.

Rico Rodríguez, A., Mendoza Díaz, A., y Mayoral Grajeda, E. (1997). *Identificación de las mercancías movidas por los principales corredores de transporte terrestre mexicanos*. Publicación Técnica 98, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México.

Robillard P. (1975). " Estimating the OD Matrix from Observed Link Volumes ". *Transportation Research 9*, 123-128. 1975.

Rodrigue, Jean-Paul, Comtois, Claude y Slack, Brian. (2006). *The Geography of Transport Systems*. Abingdon, Oxon: Routledge.

SCT. (2013). *Anuario Estadístico 2012*. Dirección General de Planeación. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. México, D.F.

SCT-UNAM. (2012). Información generada o recopilada bajo contrato con la SCT por la Unidad de Geotecnología Inteligente en Transporte y Sustentabilidad del Instituto de Tecnología de la UNAM.

SENER. (2013). Secretaría de Energía. *Balance Nacional de Energía 2012*. México, D.F.

Spiess H. (1987). " A maximum-likelihood model for estimating origin-destination matrices ". *Transportation Research, 21B*.

The Physics Factbook. (2009). Energy Density of Diesel Fuel. Glen Elert, editor. En: http://hypertextbook.com/facts/2006/TatyanaNektalova.shtml.

Turnquist, M. y Gur, Y. (1979). " Estimation of Trip Tables from Observed Link Volumes ". *Transportation Research Record, 730*, 1-6.

Van Zuylen, H. J. y Willumsen, L. G. (1980). " The most likely trip matrix estimated from traffic counts ". *Transportation Research, 14B(13)*, 218-293. 1980.

Yang, H., Iida, Y., y Sasaki, T. (1991). " An analysis of the reliability of an origin-destination trip matrix estimated from traffic counts ". *Transportation Research, 25B(5)*, 351-363.

Anexo A. Homologación de los tipos de producto

Capítulos	Equivalente en ferrocarril
01. Animales vivos	EXCLUSIVO CARRETERA
02. Carnes y desecho comestibles	EXCLUSIVO CARRETERA
03. Pescados, crustáceos, moluscos y otros invertebrados acuáticos	EXCLUSIVO CARRETERA
04. Leche y productos lácteos; huevo de ave; miel natural; productos comestibles de origen animal no expresados ni comprendidos en otras partidas	EXCLUSIVO CARRETERA
05. Los demás productos de origen animal no expresados ni comprendidos en otras partidas	EXCLUSIVO CARRETERA
06. Los demás productos de origen animal no expresados ni comprendidos en otras partidas	EXCLUSIVO CARRETERA
07. Legumbres y hortalizas, plantas, raíces y tubérculos alimenticios	EXCLUSIVO CARRETERA
08. Frutas comestibles; cortezas de agrios o de melones	EXCLUSIVO CARRETERA
09. Café, té, yerba mate y especias	GRANELES VEGETALES
10. Cereales	GRANELES VEGETALES
11. Productos de la molinería; malta; almidón y fécula; inulina; gluten de trigo	GRANELES VEGETALES
12. Semillas y frutos oleaginosos; semillas y frutos diversos; plantas industriales o medicinales; paja y forrajes	EXCLUSIVO CARRETERA
13. Gomas, resinas y demás jugos y extractos vegetales	EXCLUSIVO CARRETERA
14. Materias trenzables y demás productos de origen vegetal, no expresados ni comprendidos en otras partidas	EXCLUSIVO CARRETERA
15. Grasas y aceites animales o vegetales; productos de su desdoblamiento, grasas alimenticias elaboradas; ceras de origen animal o vegetal	EXCLUSIVO CARRETERA
16. Preparaciones de carne, de pescado o de crustáceos, de moluscos o de otros invertebrados acuáticos	EXCLUSIVO CARRETERA
17. Azúcares y artículos de confitería	EXCLUSIVO CARRETERA
18. Cacao y sus preparaciones	EXCLUSIVO CARRETERA

19. Preparaciones a base de cereales, harina, almidón, fécula o leche, productos de pastelería	EXCLUSIVO CARRETERA
20. Preparaciones de legumbres u hortalizas, de frutos o de otras partes de plantas	EXCLUSIVO CARRETERA
21. Preparaciones alimenticias diversas	EXCLUSIVO CARRETERA
22. Bebidas, líquidos alcohólicos y vinagres	EXCLUSIVO CARRETERA
23. Residuos y desperdicios de las bebidas alimentarias; alimentos preparados para animales	EXCLUSIVO CARRETERA
24. Tabaco y sucedáneos del tabaco elaborados	EXCLUSIVO CARRETERA
25. Sal; azufre; tierras y piedras; yesos; cales y cementos	GRANELES MINERALES
26. Minerales, escorias y cenizas	GRANELES MINERALES
27. Combustibles minerales, aceites minerales y productos de su destilación; materias bituminosas; ceras minerales	GRANELES LIQUIDOS
28. Productos químicos inorgánicos; compuestos inorgánicos u orgánicos de los metales preciosos, de los elementos radioactivos, de los metales de las tierras raras de isótopos	CONTENEDORES
29. Productos químicos orgánicos	CONTENEDORES
30. Productos Farmacéuticos	CONTENEDORES
31. Abonos	CARGA GENERAL NO CONTENERIZADA
32. Extractos curtientes tintóreos; taninas y sus derivados; pigmentos y demás materiales colorantes; pinturas y barnices; mastiques; tintas	CONTENEDORES
33. Aceites esenciales y resinoides; preparaciones de perfumería de tocador o de cosmética	CONTENEDORES
34. Jabones, agentes de superficie orgánicos, preparaciones para lavar, preparaciones lubricantes, ceras artificiales, ceras preparadas, productos de limpieza, velas y artículos similares, pastas para modelar, ceras para odontología y preparaciones de odontología a base de yeso	CONTENEDORES
35. Materiales albuminoideas; productos a base de almidón o de fécula modificados; colas; enzimas	CONTENEDORES
36. Pólvoras y explosivos; artículos de pirotecnia; fósforos (cerillas); aleaciones pirofóricas; materias inflamables	MATERIALES PELIGROSOS
37. Productos fotográficos o cinematográficos	CONTENEDORES
38. Productos diversos de la industria de la química	PRODUCTOS QUIMICOS

39. Materias plásticas y manufacturas de estas materias	CONTENEDORES
40. Caucho y manufacturas de caucho	CONTENEDORES
41. Pieles (excepto la peletería) y cueros	CONTENEDORES
42. Manufacturas de cueros; artículos de guarnicionería y talabartería; artículos de viaje; bolsas de mano y continentes similares, manufacturas de tripa	CONTENEDORES
43. Peletería y confecciones de peletería; peletería artificial o ficticia	CONTENEDORES
44. Madera, carbón vegetal y manufacturas de madera	PRODUCTOS FORESTALES
45. Corcho y sus manufacturas	CARGA GENERAL NO CONTENERIZADA
46. Manufacturas de espartería o cestería	CARGA GENERAL NO CONTENERIZADA
47. Pastas de madera o de otras materias fibrosas celulósicas, desperdicios y desechos de papel y cartón	CONTENEDORES
48. Papel y cartón; manufacturas de pasta de celulosa; de papel o cartón	CONTENEDORES
49. Productos editoriales, de la prensa o de otras industrias gráficas; textos manuscritos o mecanografiados y planos	CONTENEDORES
50. Seda	CONTENEDORES
51. Lana y pelo fino u ordinario; hilados y tejidos de crin	CONTENEDORES
52. Algodón	CONTENEDORES
53. Las demás fibras textiles vegetales; hilados de papel y tejidos de hilados de papel	CONTENEDORES
54. Filamentos sintéticos o artificiales	CONTENEDORES
55. Fibras sintéticas	CONTENEDORES
56. Guata, fieltro y telas; hilados especiales; cordeles, cuerdas y cordajes; artículos de cordelería	CONTENEDORES
57. Alfombras y demás revestimientos para el suelo	CONTENEDORES
58. Tejidos especiales; superficies textiles con pelo insertado; encajes, tapicería; pasamanería; bordados	CONTENEDORES
59. Tejidos impregnados; recubiertos, revestidos o estratificados; artículos técnicos de materias textiles	CONTENEDORES

60. Tejidos de punto	CONTENEDORES
61. Prendas y complementos de vestir, de punto	CONTENEDORES
62. Prendas y complementos de vestir, excepto las de punto	CONTENEDORES
63. Los demás artículos confeccionados; conjuntos o surtidos; prendería y trapos	CONTENEDORES
64. Calzado, polainas, botines y artículos análogos, partes de estos artículos	CONTENEDORES
65. Artículos de sombrerería y sus partes	CONTENEDORES
66. Paraguas, sombrillas, quitasoles, bastones, bastones-asientos, látigos, fustas y sus partes	CONTENEDORES
67. Plumas y plumón preparados y artículos de plumas y plumón, flores artificiales; manufacturas de cabellos	CONTENEDORES
68. Manufacturas de piedra, yeso, cemento, amianto, mica o materias análogas	CONTENEDORES
69. Productos cerámicos	CONTENEDORES
70. Vidrio y manufacturas de vidrio	CONTENEDORES
71. Perlas finas o cultivadas, piedras preciosas y semipreciosas o similares, metales preciosos, chapados de metales preciosos y manufacturas de estas materias; bisutería; monedas	EXCLUSIVO CARRETERA
72. Fundición, hierro y acero	HIERRO, ACERO Y SUS DERIVADOS
73. Manufacturas de fundición de hierro o de acero	HIERRO, ACERO Y SUS DERIVADOS
74. Cobre y manufacturas de cobre	CONTENEDORES
75. Níquel y manufacturas de níquel	CONTENEDORES
76. Aluminio y manufacturas de aluminio	CONTENEDORES
77. Está reservado para una futura utilización en el Sistema Armonizado	CONTENEDORES
78. Plomo y manufacturas de plomo	CONTENEDORES
79. Zinc y manufacturas de zinc	CONTENEDORES
80. Estaño y manufacturas de estaño	CONTENEDORES
81. Los demás metales comunes; “cermets”; manufacturas de estas materias	CONTENEDORES
82. Herramientas y útiles; artículos de cuchillería y cubiertos de mesa, de metales comunes; partes de estos artículos, de metales comunes	CONTENEDORES

83. Manufacturas diversas de metales comunes	CONTENEDORES
84. Reactores nucleares, calderas, máquinas, aparatos y artefactos mecánicos; partes de estas máquinas o aparatos	CARGA GENERAL NO CONTENERIZADA
85. Máquinas, aparatos y materia eléctrico y sus partes; aparatos de grabación o reproducción de sonido, aparatos de grabación o reproducción de imágenes y sonido en televisión y las partes y accesorios de estos aparatos	CONTENEDORES
86. Vehículos y material para vías férreas o similares y sus partes, aparatos mecánicos (incluso electromecánicos) de señalización para vías de comunicación	CARGA GENERAL NO CONTENERIZADA
87. Vehículos, automóviles, tractores, triciclos y demás vehículos terrestres, sus partes y accesorios	AUTOS NUEVOS
88. Navegación aérea o espacial	CARGA GENERAL NO CONTENERIZADA
89. Navegación marítima o fluvial	CARGA GENERAL NO CONTENERIZADA
90. Instrumentos y aparatos de óptica, fotografía o cinematografía, de medida, control o precisión, instrumentos y aparatos médico-quirúrgicos; partes y accesorios de estos instrumentos o aparatos	CONTENEDORES
91. Relojería	CONTENEDORES
92. Instrumentos musicales; partes y accesorios de estos instrumentos	CONTENEDORES
93. Armas y municiones, sus partes y accesorios	CONTENEDORES
94. Muebles; mobiliario médico-quirúrgico; artículos de cama y similares; aparatos de alumbrado no expresados ni comprendidos en otras partidas; anuncios, letreros y placas indicadoras, luminosos y artículos similares; construcciones prefabricadas	CONTENEDORES
95. Juguetes, juegos y artículos para recreo o para deportes; sus partes y accesorios	CONTENEDORES
96. Manufacturas diversas	CONTENEDORES
97. Objetos de arte, de colección o de antigüedades	EXCLUSIVO CARRETERA
98. Importación de mercancías mediante operaciones especiales	CARGA GENERAL NO CONTENERIZADA

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

SCT

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

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/