

Universidad Autónoma de Querétaro
Maestría en Ciencias. Ingeniería Matemática

El transporte terrestre de carga en México: un modelo de reparto carretera -
ferrocarril

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ciencias

Presenta:

L.M.A. Luisa Ramírez Granados

Dirigido por:
Dr. Eric Moreno Quintero

Dr. Eric Moreno Quintero
Presidente


Firma

Dr. Ricardo Montoya Zamora
Secretario


Firma

M. en I. Óscar Rico Galeana
Vocal


Firma

Dr. Roberto Augusto Gómez Loenzo
Suplente


Firma

M. en C. Irma Molina Flores
Suplente


Firma


Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad


Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y Posgrado

RESUMEN

En México, el transporte de carga terrestre es de suma importancia para el sector productivo nacional; se hace principalmente por carretera y en menor grado por ferrocarril. El predominio del autotransporte de carga sobre el ferrocarril durante la mayor parte del siglo XX se ha reducido en la primera década del nuevo siglo, en buena medida por la desregulación del autotransporte a principios de los años 1990 y por la privatización de los ferrocarriles en 1997. En el reparto modal actual sin embargo, sigue siendo mayor la parte del autotransporte, a pesar de que su eficiencia técnica y ambiental es inferior a la del ferrocarril. Este trabajo propone modelar el transporte de carga terrestre como una red bimodal con una parte carretera y otra ferroviaria conectadas por terminales de transferencia. Se plantea el problema de encontrar la distribución de flujos de carga en la red bimodal de modo que la operación para cada modo de transporte sea de costo mínimo, a la vez que se atienden las demandas de movimiento de carga. La base matemática es el problema de la ruta más corta, el cual se extiende al caso en que la red tiene multitud de usuarios y surge la congestión que alarga los tiempos de traslado. Usando los Principios de Wardrop y sus criterios de optimización, se plantean los elementos necesarios para el modelo de asignación de flujos utilizando el software TransCAD especializado en planeación del transporte, considerando cuatro escenarios que contrastan los resultados. Los resultados de la modelación muestran que el ferrocarril es, en efecto, más eficiente tanto en costo como en el aspecto ambiental. En cuanto a tiempo de traslado, el autotransporte resulta más eficiente. La asignación de flujos obtenida en la modelación sugiere que el sector del transporte terrestre actual tiene oportunidades en diversos ámbitos para incentivar un movimiento de carga terrestre más equilibrado y con menores impactos no deseados.

(Palabras clave: Red bimodal, asignación bimodal, principios de Wardrop)

SUMMARY

In Mexico, land freight transport is critical to the national productive sector; it is done mainly by road and by rail to a lesser extent. The truck dominance over the railway for most of the twentieth century has been reduced in the first decade of the new century, largely by deregulation of trucking in the early 1990s and the privatization of the railways in 1997. In the current modal split however the motor carrier still has the most, despite its technical and environmental efficiency is lower than that of the railroad. This work proposes to model the road freight as a bimodal network with a road and another part connected by rail transfer terminals. It is posed the problem of finding the distribution of freight flows in the bimodal network so that the operation for each mode of transport be of minimal cost, while the cargo movement demands are met. The mathematical basis is the problem of the shortest route, which extends to the case when the network has many users and congestion arises lengthening the travel time. Using the principles of Wardrop and their optimization criteria, the needed elements for the flow allocation model are posed, using the TransCAD software specialized in transportation planning, considering four scenarios to contrast results. The modeling results show that the railroad is indeed more efficient in both cost and environmental considerations. In terms of travel time, road transport is more efficient. The traffic assignment obtained in the modeling suggests that the current land transport sector has opportunities in various fields to encourage more balanced movement and fewer undesirable impacts land cargo.

(Key words: bimodal network, bimodal assignment, Wardrop's principles)

A mis abuelitos

AGRADECIMIENTOS

El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), que brindó la contribución financiera para esta tesis e impulsa el desarrollo de investigación científica en México.

Al Dr. Eric Moreno Quintero, investigador del Instituto Mexicano del transporte, por su paciencia, asesoramiento y guía para la realización de esta tesis.

Al Dr. Ricardo Montoya Zamora, por su apoyo y asesoramiento en el uso del manejo de datos y del software TransCAD.

A mis padres, novio y amigos quienes me apoyaron durante el curso de la maestría.

TABLA DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN	13
2.	OBJETIVOS	19
2.1	ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	19
2.2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	26
2.3	HIPÓTESIS	26
2.4	OBJETIVO GENERAL.....	27
2.5	OBJETIVOS PARTICULARES.....	27
3.	METODOLOGÍA	28
3.1	EL PROBLEMA DE LA RUTA MÁS CORTA	28
3.1.1	<i>Algoritmo de Dijkstra</i>	30
3.1.2	<i>Algoritmo General</i>	34
3.1.3	<i>Algoritmo de Floyd</i>	37
3.2	FUNCIONES DE VOLUMEN – DEMORA.....	42
3.2.1	<i>Función BPR</i>	44
3.2.2	<i>Función de Akcelik</i>	50
3.2.3	<i>Función cónica de demora</i>	52
3.2.4	<i>Comparación entre funciones</i>	55
3.3	CRITERIOS DE OPTIMALIDAD	56
3.3.1	<i>Primer principio de Wardrop</i>	56
3.3.2	<i>Segundo principio de Wardrop</i>	57
3.3.3	<i>Ejemplo básico de aplicación de los principios de Wardrop</i>	58
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	62
4.1	MODELO DE ASIGNACIÓN	62
4.2	RESTRICCIONES DE LA MODELACIÓN.....	65
4.3	LA MATRIZ ORIGEN-DESTINO	65
4.4	MODELACIÓN	67
4.5	EMISIÓN DE CONTAMINANTES	70
4.6	CONCLUSIONES	76
5.	REFERENCIAS	78

ÍNDICE DE TABLAS

1-1. Libras de emisiones por tonelada-milla (Fuente: Haulk, 1998)	19
3-2. Parámetros de la función BPR para autopistas norteamericanas (NCHRP, 1998)	46
3-3. Parámetros de la función BPR para carreteras multi-carril norteamericanas (NCHRP, 1998)	46
4-4. Valores de α y β para fines de la modelación	63
4-5. Reparto de toneladas por modo.....	66
4-6. Tabla de costos de operación de ambos modos por tipo de terreno.....	67
4-7. Fuente de emisión de contaminantes para diferentes escenarios (CDM,2011)	71

ÍNDICE DE FIGURAS

1. Porcentaje del tránsito terrestre en carretera en millones de toneladas (Fuente: Manual Estadístico del Sector Transporte 2009, 2013).....	15
2. Porcentaje del tránsito terrestre en ferrocarril en millones de toneladas (Fuente: Manual Estadístico del Sector Transporte 2009, 2013).....	15
3. Porcentaje del tránsito terrestre en carretera en millones de toneladas-kilómetro (Tkm) (Fuente: Manual Estadístico del Sector Transporte 2009, 2013)	16
4. Porcentaje del tránsito terrestre en ferrocarril en millones de toneladas-kilómetro (Tkm) (Fuente: Manual Estadístico del Sector Transporte 2009, 2013)	16
5. Comparación de kilómetros recorridos con una tonelada en cada modo (Fuente: Superior Rail Support Incorporated, 2014).....	17
6. Comparación de unidades de ferrocarril y autotransporte al mover 1500 toneladas (Fuente: KAR, 2014).....	18
7. Intensidad energética del transporte de carga por modo (MJ/tkm), 2009 (Fuente: Bourges Diaz, 2011).....	18
8. Toneladas movidas por modo (Fuente: Manual Estadístico del Sector Transporte 2009, 2013).....	20
9. Distancia media de recorrido por modo (Fuente: Manual Estadístico del Sector Transporte 2009, 2013).....	21
10. Eficiencia energética para toneladas movidas (ton/litro): autotransporte y ferrocarril (Fuente: Manual Estadístico del Sector Transporte 2012, Anuario Estadístico Ferroviario 2012).....	21
11. Eficiencia energética (tkm/litro) para tkm: autotransporte y ferrocarril (Fuente: Manual Estadístico del Sector Transporte 2012, Anuario Estadístico Ferroviario 2012)	22

12. Evolución y tendencia del movimiento de contenedores por la Frontera Norte de México, 1996-2012. (Martner y Pérez, 2012).	24
13. Ejemplo de la red para algoritmo de Dijkstra	31
14. Red resuelta con algoritmo de Dijkstra	32
15. Red del contraejemplo para el Algoritmo de Dijkstra	34
16. Red de ejemplo 2	36
17. Arborescencia con Algoritmo de Dijkstra	36
18. Iteración 1 del Algoritmo General	37
19. Ruta más corta con el Algoritmo General	37
20. Velocidades medidas y estimadas como función de la tasa de flujo en la Eastern Freeway en Melbourne, Australia (incluyendo condiciones de flujo forzado) (Akcelik, 2013).	43
21. Función BPR con diferentes niveles de β y $\alpha = 0.15$.	48
22. Función BPR con diferentes niveles de α , con $\beta = 4$.	48
23. Función de Akcelik con diferentes valores de J_a .	51
24. Función cónica de demora con distintos valores de α .	54
25. Funciones de volumen – demora con saturación menor a 1.	55
26. Caminos de ciudad “A” a “B”	59
27. Asignación de toneladas de ferrocarril y autotransporte con base en el tiempo de viaje por arco. (Fuente: elaboración propia).	69
28. Asignación de toneladas de ferrocarril y autotransporte con base en el costo de operación. (Fuente: elaboración propia).	70

29. Emisión de contaminantes en el corredor México-Nuevo Laredo sin intercambio de mercancía en la red bimodal. (Fuente: elaboración propia)..... 74

30. Emisión de contaminantes en el corredor México-Nuevo Laredo con intercambio de mercancía en la red bimodal. (Fuente: elaboración propia)..... 75

1. INTRODUCCIÓN

El movimiento terrestre de carga es de suma importancia económica en México, esto se da principalmente por el suministro de materias primas al sector industrial, el movimiento de productos intermedios a centros de procesamiento y la distribución de productos terminados a los centros de almacenamiento, a la exportación o al consumo final.

El transporte terrestre de carga en México, se hace principalmente por carretera y en menor grado por ferrocarril; ambos modos están desregulados, establecen libremente sus tarifas y compiten por transportar las cargas en los distintos mercados. Las características propias de cada medio de transporte como: cobertura, capacidad de tonelaje movido, la distancia recorrido, tiempo de traslado, costo de operación, consumo de combustible entre otros, son ventajas y desventajas por la que el usuario decide el reparto modal de los flujos entre autotransporte y ferrocarril.

A finales del siglo XX, en el país se hicieron dos reformas muy importantes para el sector del transporte: la desregulación del autotransporte de carga entre 1989 y 1994, y la privatización del servicio ferroviario en 1997, éstas iniciaron cambios en los movimientos de carga terrestre que aún se manifiestan en la actualidad.

Las modificaciones regulatorias principales, fueron (Rico, 1998):

- Se eliminó la regionalización en rutas (1989).
- Se eliminó la obligación de acudir a las centrales de servicios de carga (1989).
- Se estableció la red federal de carreteras como zona de competencia (1989).
- Se liberó la competencia a través de las tarifas (1989).
- Se eliminaron los Comités de Ruta que evaluaban y otorgaban concesiones (1989).

- Se permitió a autotransportistas privados dar servicio de transporte a terceros (1989).
- Se dejó de considerar al autotransporte de carga como servicio público propio del Estado (1993).
- Se eliminó la clasificación del servicio como carga regular o carga especializada, permitiendo mover cualquier mercancía, siempre que los vehículos cumplieran la reglamentación relativa a la carga movida (1994).

En cuanto a la privatización ferroviaria, en diciembre de 1996, la primera línea formalmente concesionada fue el Ferrocarril del Noroeste, ganada por Traspotación Ferroviaria Mexicana (TFM), asociada con la norteamericana Kansas City Southern Industries.

A principios de 1997 la SCT dio a conocer las líneas troncales restantes que se concesionarían: la del Pacífico Norte, la del Sureste y la de la Terminal del Valle de México, quedando a cargo de las líneas Ferrocarril Mexicano (Ferromex), Ferrocarril del Sureste (Ferrosur) y Ferrocarriles del Valle de México (Ferrovalle) respectivamente (Moreno, 1997). La nueva estructura del ferrocarril en México le permitió competir mejor con el autotransporte y atraer nuevos flujos de carga.

Las participaciones porcentuales en millones de toneladas movidas del transporte terrestre de carga en el periodo 1993–2013 se muestran en la Figura 1 y en la Figura 2 enseguida. Análogamente, las participaciones porcentuales de los modos en millones de toneladas-kilómetro se muestran en la Figura 3 y en la Figura 4.

La variación más notable en estas figuras es en los años 1997 y 1998, al inicio de operaciones de los ferrocarriles privatizados y en los que se nota un claro aumento de la participación ferroviaria y una disminución en el modo carretero. En los años siguientes variaciones diversas reflejan la competencia entre los modos, pero en general se nota aumento en la participación ferroviaria y reducción en la

del autotransporte, aunque sólo en unos tres puntos porcentuales aproximadamente en todo el periodo.

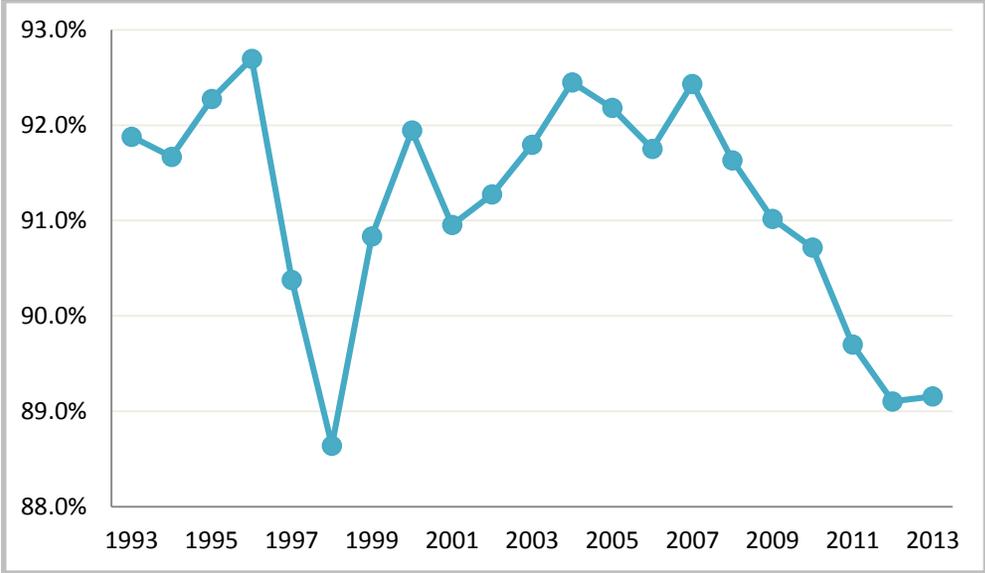


Figura 1. Porcentaje del tránsito terrestre en carretera en millones de toneladas (Fuente: Manual Estadístico del Sector Transporte 2009, 2013)

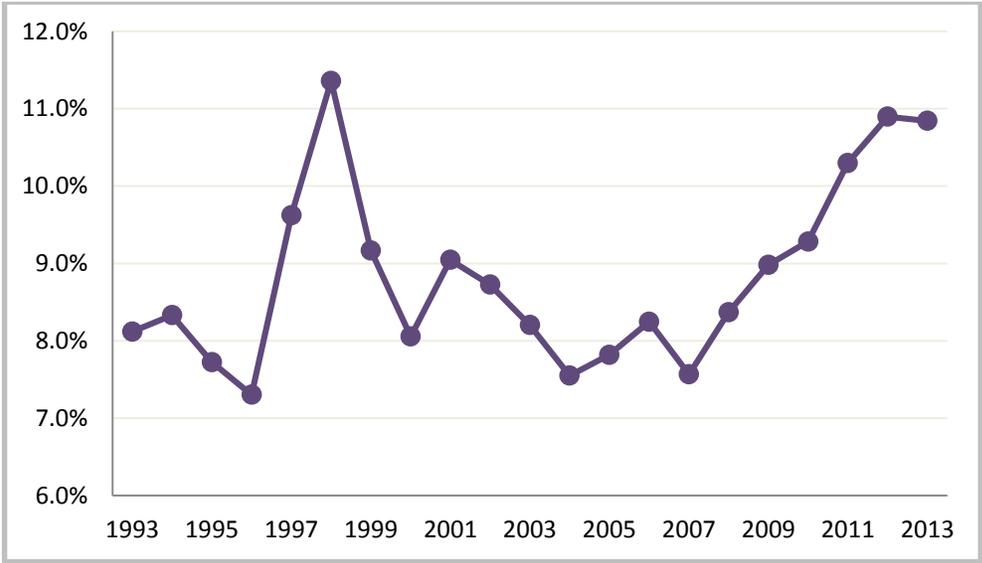


Figura 2. Porcentaje del tránsito terrestre en ferrocarril en millones de toneladas (Fuente: Manual Estadístico del Sector Transporte 2009, 2013)

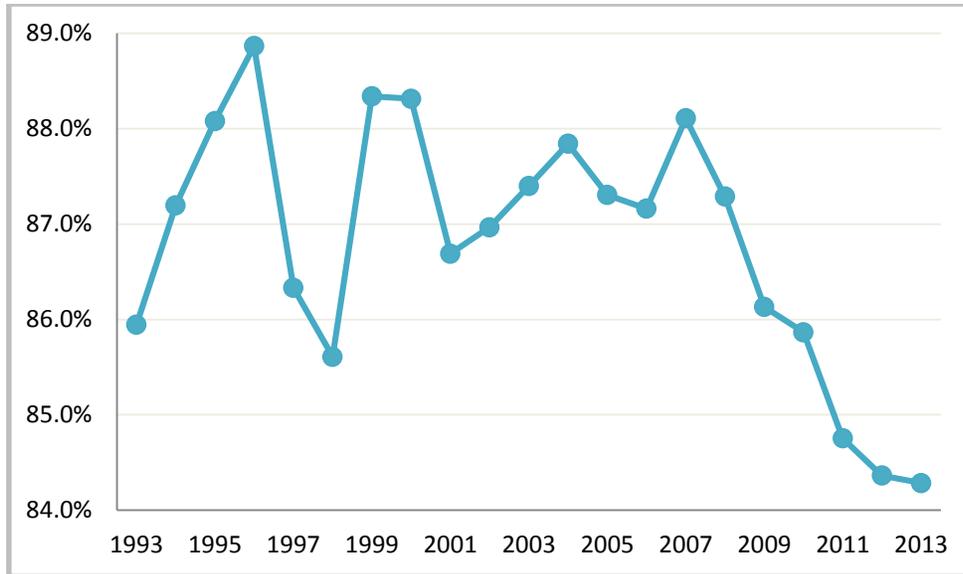


Figura 3. Porcentaje del tránsito terrestre en carretera en millones de toneladas-kilómetro (Tkm) (Fuente: Manual Estadístico del Sector Transporte 2009, 2013)

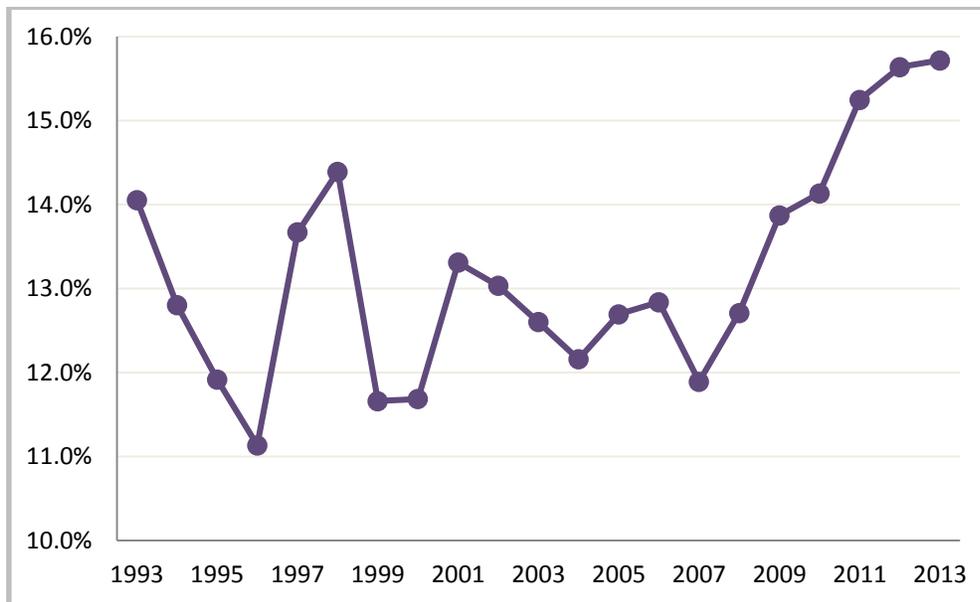


Figura 4. Porcentaje del tránsito terrestre en ferrocarril en millones de toneladas-kilómetro (Tkm) (Fuente: Manual Estadístico del Sector Transporte 2009, 2013)

A partir de los datos de las figuras anteriores, se hizo un pronóstico por promedio móvil, el cual muestra que se puede esperar que la participación

porcentual del ferrocarril sea de por lo menos 10.87% en el movimiento de toneladas y de 15.67% en la producción de toneladas-kilómetro para el 2014.

Si bien el autotransporte beneficia sin duda a la actividad económica, tiene efectos negativos como son la congestión, la contaminación, los accidentes, el ruido y el daño a la infraestructura; éste último efecto, no se manifiesta de forma inmediata como los demás impactos, pero llega a ocasionar gastos importantes en el presupuesto de reparación de tramos carreteros; es generado principalmente por los vehículos de carga y el problema crece al aumentar el peso de las cargas, el cual, llega a sobrepasar los límites permitidos en porcentajes no despreciables (Gutiérrez Hernández, Soria Anguiano, 2013).

Aunque el autotransporte es aconsejable cuando las cargas se mueven en un recorrido local o corto, o en destinos que el ferrocarril no alcanza directamente, éste es más eficiente. Por ejemplo, un litro de combustible puede mover una tonelada de carga 37 kilómetros en autotransporte y 147 kilómetros en ferrocarril, es decir, es más económico mover una tonelada por ferrocarril que en autotransporte (Figura 5).

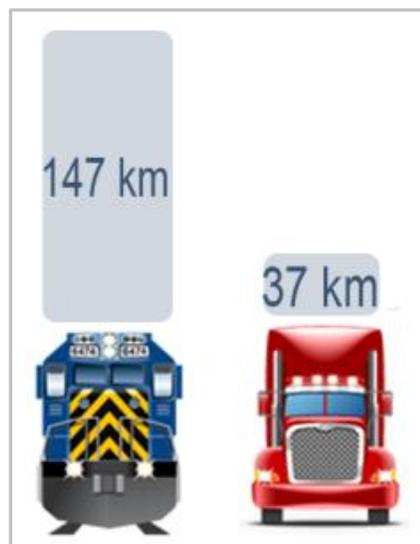


Figura 5. Comparación de kilómetros recorridos con una tonelada en cada modo (Fuente: Superior Rail Support Incorporated, 2014)

Otro ejemplo de la eficiencia del ferrocarril, es que si se quisieran mover 1500 toneladas de carga, en ferrocarril se utilizarían 15 vagones (de 100 toneladas) y 60 camiones de 25 toneladas cada uno, como se ve en la Figura 6.

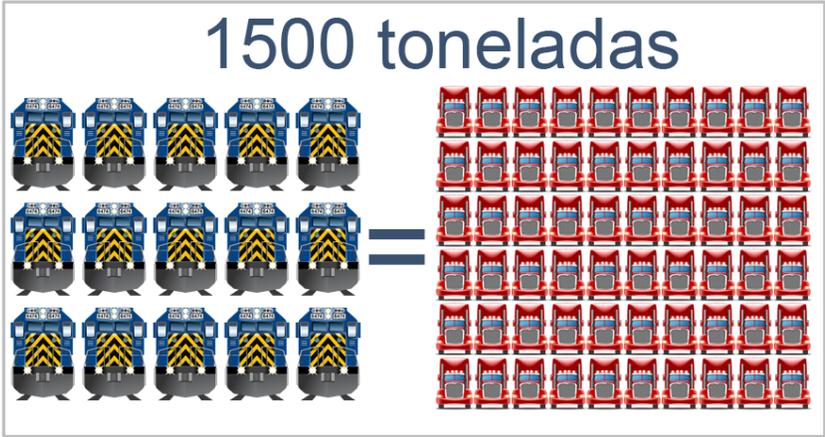


Figura 6. Comparación de unidades de ferrocarril y autotransporte al mover 1500 toneladas (Fuente: KAR, 2014)

En la Figura 7, se puede ver que el consumo de energía es mucho mayor en el autotransporte que en ferrocarril, esto obviamente por las toneladas-kilómetro registradas.

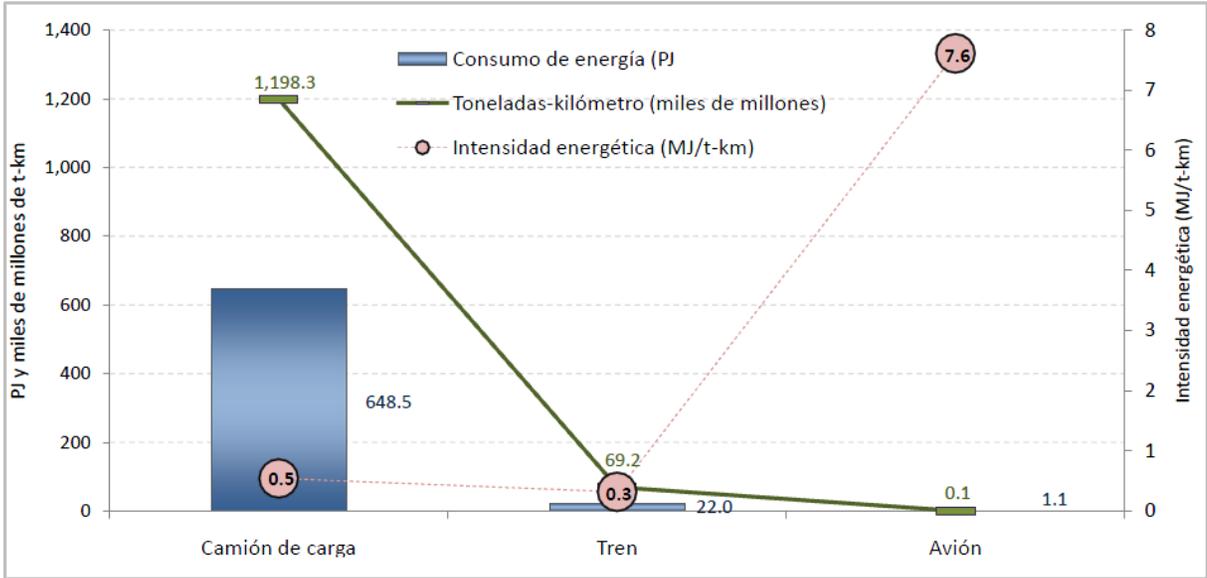


Figura 7. Intensidad energética del transporte de carga por modo (MJ/tkm), 2009 (Fuente: Bourges Diaz, 2011)

Ahora, al analizar las emisiones de contaminantes de ambos modos, el ferrocarril es más eficiente que el autotransporte, como se ve en la Tabla 1-1:

Tabla 1-1. Libras de emisiones por tonelada-milla (Fuente: Haulk, 1998)

Modo	Hidrocarburos	Monóxido de carbono	Óxido nitroso
Autotransporte	0.0063	0.0190	0.1017
Ferrocarril	0.0046	0.0064	0.0183

Una alternativa a los problemas ocasionados por el autotransporte ha sido sustituir éste por el ferrocarril (Behrends, 2012), tratando de impulsar de alguna forma este modo de transporte; en países de gran desarrollo como Estados Unidos, Canadá o de la Unión Europea, se ha comenzado por hacer la sustitución tanto para transporte de carga como de pasajeros, obteniendo buenos niveles de eficiencia; esto ha llevado a los planificadores del transporte a motivar a los usuarios a utilizar el ferrocarril como vía alterna para el movimiento de carga que así lo permita.

El objetivo de este trabajo es utilizar la modelación matemática del flujo de carga en las redes carretera y ferroviaria nacionales bajo el supuesto de que los transportistas buscarán minimizar el costo total de transportar sus cargas, a la vez que se satisfacen las demandas de transporte de los clientes. Derivado de esto se tendrá una reducción en consumos de combustible, en emisiones contaminantes y en las distancias totales recorridas.

2. OBJETIVOS

2.1 Antecedentes y justificación

El reparto modal del movimiento de carga terrestre ha estado dominado por el autotransporte a pesar de la privatización del servicio ferroviario en 1997. Por ejemplo la Figura 8, muestra las toneladas movidas por modo en el periodo 1993-2013, en la que el modo carretero aventaja al ferrocarril.

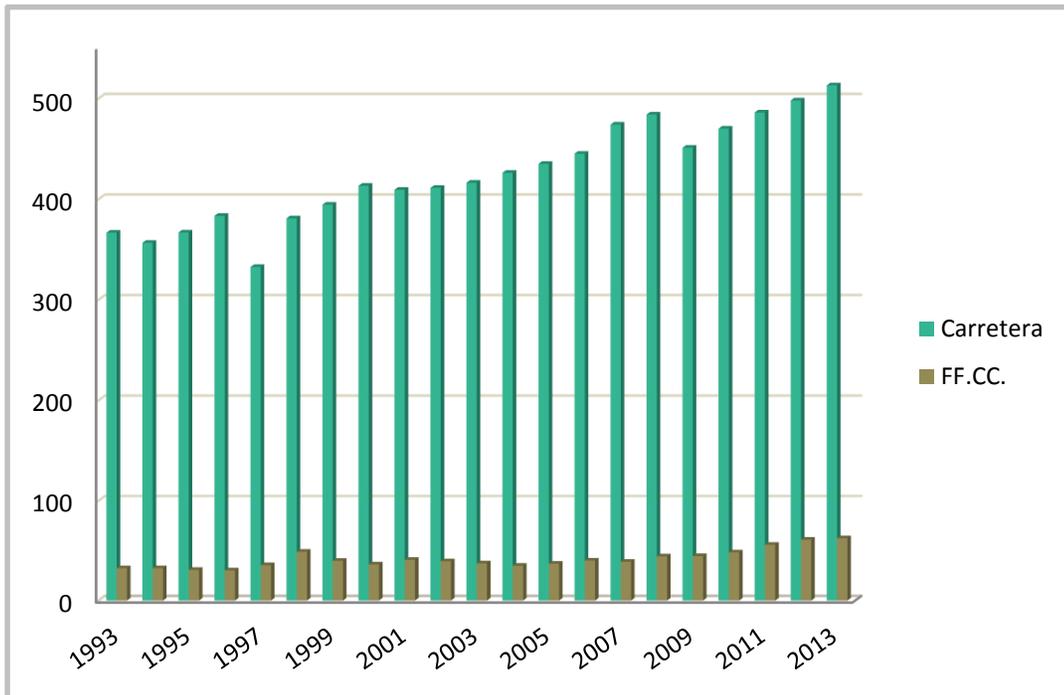


Figura 8. Toneladas movidas por modo (Fuente: Manual Estadístico del Sector Transporte 2009, 2013)

Al ser menores las distancias medias de recorrido del autotransporte comparadas con las del ferrocarril (ver Figura 9), y mayor el movimiento de toneladas en el autotransporte, es de esperarse que el número de viajes por carretera sea mucho mayor comparado al del ferrocarril, y por tanto que su consumo energético sea también mayor.

La eficiencia de los modos carretero y ferroviario en cuanto a consumo de combustible se ve en la Figura 10 y en la Figura 11, que muestran las toneladas movidas por litro de diésel consumido. Como se puede observar, la eficiencia energética del ferrocarril es casi dos veces mayor que para el autotransporte, lo que indica que este modo es más eficiente.

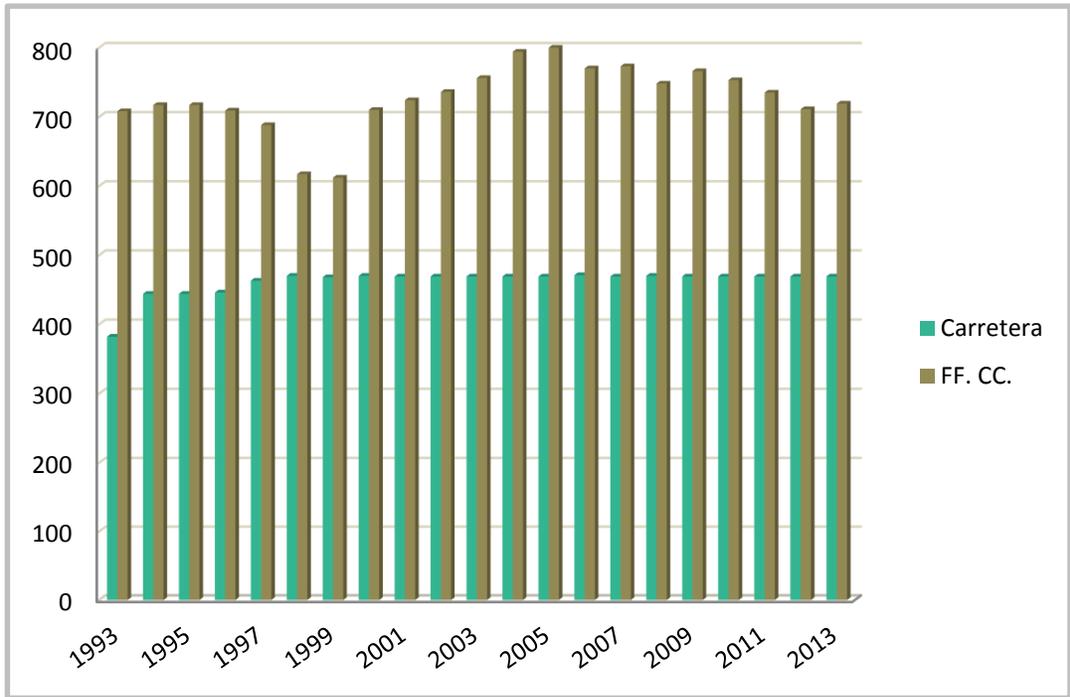


Figura 9. Distancia media de recorrido por modo (Fuente: Manual Estadístico del Sector Transporte 2009, 2013)

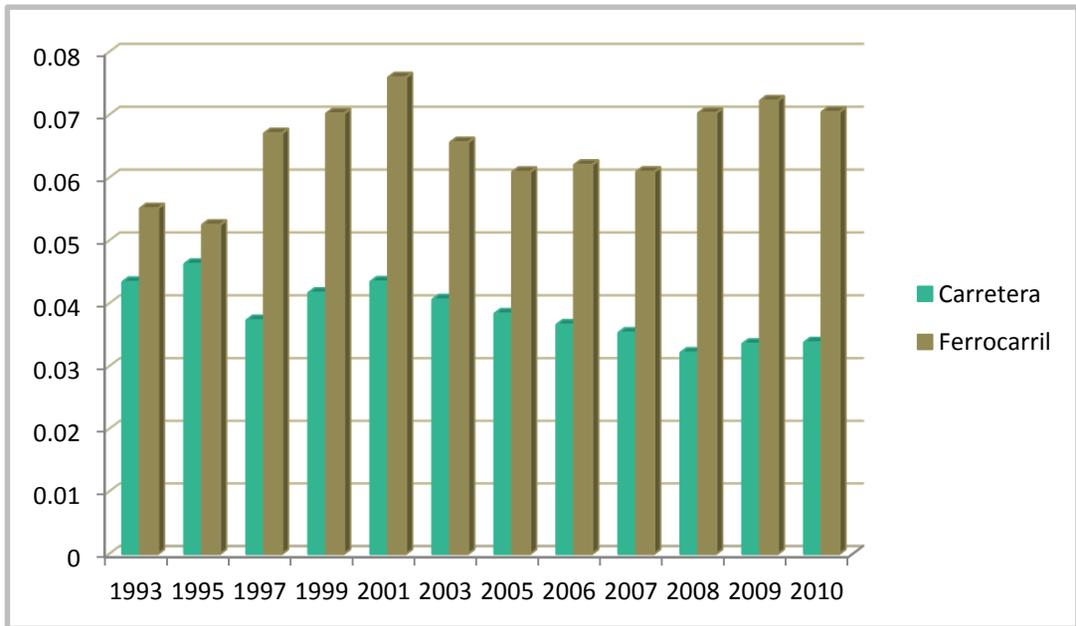


Figura 10. Eficiencia energética para toneladas movidas (ton/litro): autotransporte y ferrocarril (Fuente: Manual Estadístico del Sector Transporte 2012, Anuario Estadístico Ferroviario 2012)

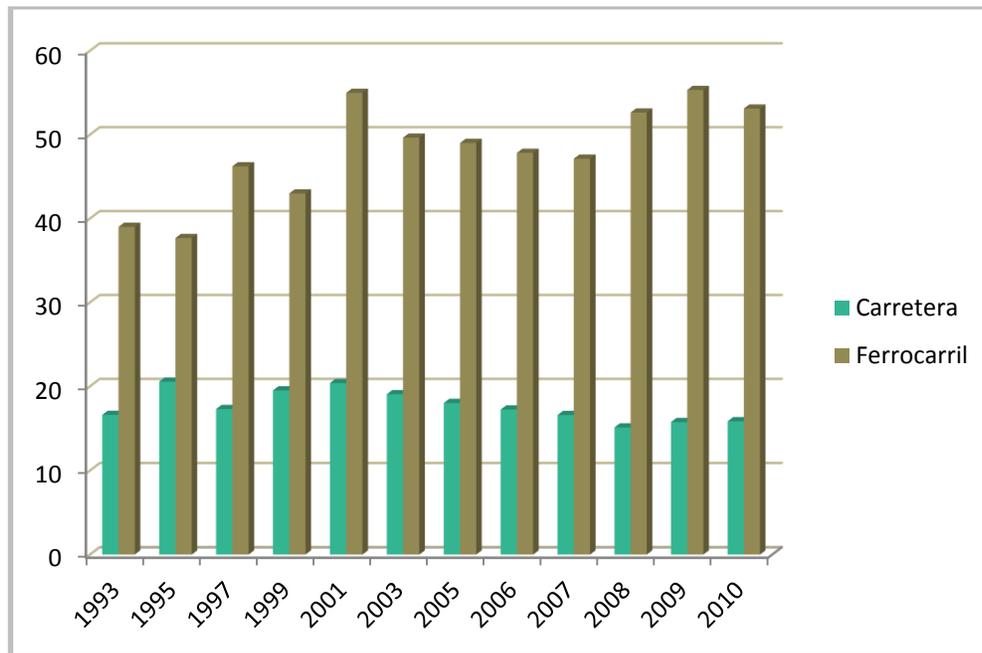


Figura 11. Eficiencia energética (tkm/litro) para tkm: autotransporte y ferrocarril (Fuente: Manual Estadístico del Sector Transporte 2012, Anuario Estadístico Ferroviario 2012)

Otro problema relacionado con el movimiento terrestre de carga en México son los vehículos sobrecargados del autotransporte.

Esta práctica común tanto en México como en países industrializados, resulta atractiva para el transportista ya que reduce el número de viajes necesarios para mover carga y le genera ahorros en su operación, pero al mismo tiempo acelera el desgaste de la infraestructura carretera y aumenta el riesgo de los accidentes viales (Moreno-Quintero, 2005). La sobrecarga en el autotransporte de carga es un problema que interesa a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, ya que ésta se encarga del mantenimiento de las carreteras libres de peaje, donde no se tiene el ingreso de las cuotas pagadas por los usuarios para enfrentar los gastos de dicho mantenimiento.

Una alternativa para atenuar esos efectos no deseados, es el uso de ferrocarril como medio alternativo para algunas cargas que actualmente se mueven por carretera y para aquellas que se mueven con exceso de peso.

En el movimiento de contenedores, Martner y Pérez (2007), describen el tránsito de carga contenerizada en los años 1996 y 2004, donde tan sólo el flujo de contenedores movilizados por ferrocarril en la frontera norte, incrementaron con una tasa media anual de 11.3%, mientras que por autotransporte la tasa media anual fue de 4.9%.

Aunque el incremento de la tasa de ferrocarril fue mayor, tan sólo en el 2004, el 87% de los contenedores movilizados cruzaron la frontera por autotransporte, y dada la tasa media anual, se hizo una proyección anual estimando que para el 2012, el 20% de los contenedores se moverían por ferrocarril, es decir, si se proyectó que para ese año se moverían en la frontera norte un total de 16 millones de TEU's (*Twenty-foot Equivalent Unit*), unidades equivalentes al contenedor de 20 pies de largo), 12.7 millones de TEU's serían movidos por autotransporte y 3.3 millones de TEU's por ferrocarril.

Los datos de 1996 a 2004 y las estimaciones de 2004 a 2012, del movimiento de contenedores, se ven en la siguiente gráfica. Estas proyecciones sugieren que en el movimiento de contenedores el ferrocarril puede seguir atrayendo carga que de otra forma se movería por carretera.

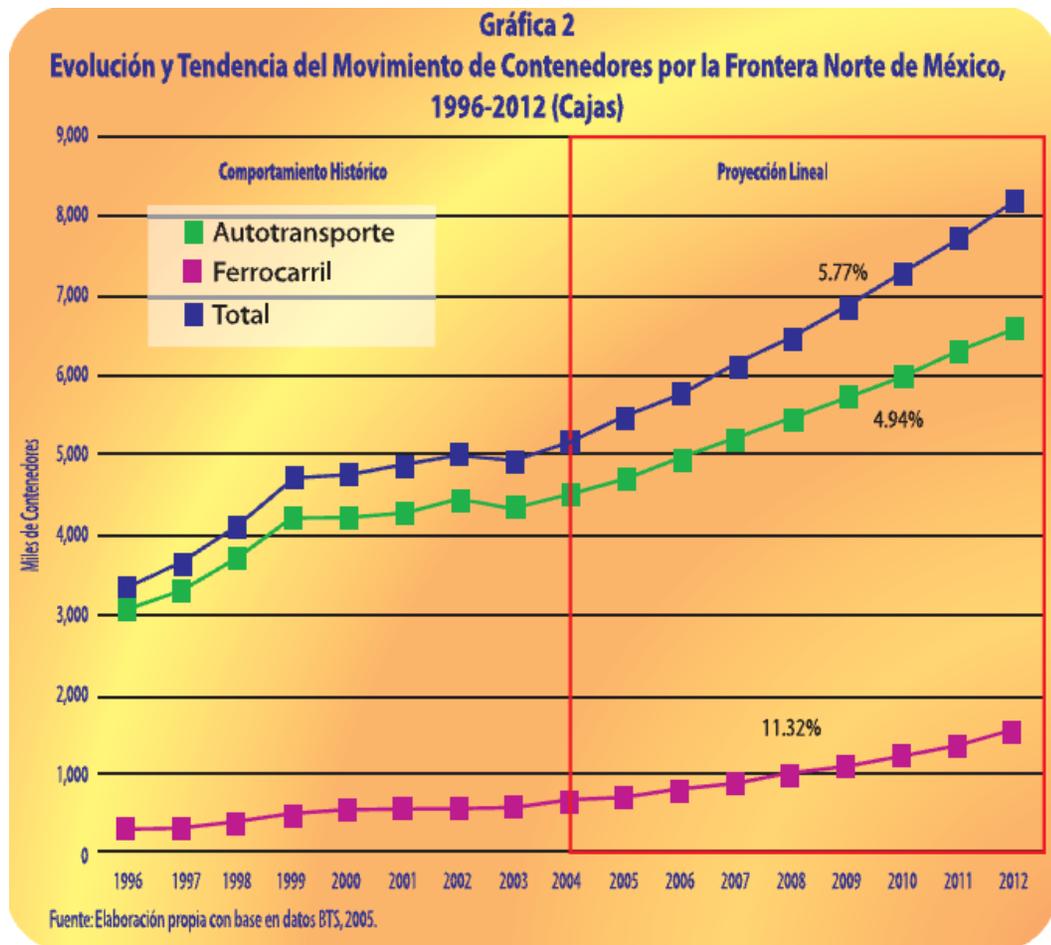


Figura 12. Evolución y tendencia del movimiento de contenedores por la Frontera Norte de México, 1996-2012. (Martner y Pérez, 2012).

Trabajos previos sobre el reparto modal entre carretera y ferrocarril se han desarrollado en México por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Un estudio es del Rico Rodríguez et al. (1995) que examina el reparto modal existente entre carretera y ferrocarril previo al año 1995, se evalúan los costos de transportación para ambos modos y se determinan los ahorros que se obtendrían al incrementar el uso del ferrocarril. Este trabajo concluye que el ferrocarril debería incrementar un 25% su captación de carga, ya que se produciría un ahorro anual del orden de 3 mil millones de pesos, tomando en cuenta los precios de Ferrocarriles Nacionales de México de 1992 a 1993; también se menciona que el traslado en tiempo por ferrocarril es el triple que el empleado por el autotransporte, por lo que

se recomendó mejorar la seguridad, puntualidad, disminución de tiempos muertos y mejoras a ambas redes federales.

Bustos Rosales et al. (2003) plantean el intermodalismo del transporte en áreas de mayor oportunidad identificadas por una serie de criterios como la cantidad de toneladas por pares estatales de origen y destino, distancias de recorrido, entre otros, resultando el Distrito Federal, Nuevo León y el Estado de México las tres primeras entidades con mayor potencial de intermodalismo para atender flujos de comercio exterior; también se proyectaron los flujos potenciales para los años 2010 y 2025 en cuatro posibles escenarios planteados de acuerdo al crecimiento de la economía nacional (crecimiento económico bajo o alto respecto a sus socios comerciales del TLCAN) y a la distribución regional de la producción, resultando el escenario más favorable el “2B” que es el de la evolución de las economías estatales y el crecimiento económico alto de México.

En países de gran desarrollo industrial, se le ha dado un gran impulso al transporte ferroviario, tanto para movimiento de personas y carga, ya que este medio de transporte ha mostrado altos niveles de eficiencia. Un ejemplo, es que Janic y Jovanovic (2012) modelaron la estimación de los posibles efectos para reducir los impactos sociales y ambientales que se podrían lograr al sustituir el transporte de carga en una red carretera por una vía ferroviaria en el corredor Trans-Europeo; entre los impactos, se consideró el ruido, la congestión, los accidentes, el consumo de energía y la contaminación; como resultado se obtuvo una disminución considerable de GHG (Greenhouse gases, gas invernadero), de incidentes o accidentes de tránsito y en general de los efectos negativos considerados en el análisis.

Al analizar el reparto modal del flujo de carga terrestre en México en este trabajo, se tendrá una primera estimación de los movimientos de carga que podrían redistribuirse del autotransporte hacia el ferrocarril, y de ahí una primera valoración de los beneficios resultantes al disminuir los impactos no deseados del transporte de carga.

2.2 Planteamiento del problema

La gran relevancia del movimiento de carga terrestre para la economía nacional lo convierte en un elemento imprescindible del ambiente productivo en el país tanto en la actualidad como en el futuro previsible a mediano plazo. Los modos carretero y ferroviario que llevan a cabo el transporte terrestre de carga tienen ventajas y desventajas diversas con las cuales compiten por el mercado de carga.

Si bien cada modo tiene ventajas por sus características propias, como el servicio puerta-a-puerta del autotransporte o el movimiento de grandes tonelajes del ferrocarril, la eficiencia energética o la ocupación espacial que tiene la infraestructura ferroviaria, son de gran interés para el planificador del sistema de transporte, ya que representan posibilidades de tener usos más racionales de los recursos invertidos en el transporte y de reducir los impactos negativos del mismo.

En los últimos años, la tendencia del reparto modal de carga entre carretera y ferrocarril, sobre todo, a partir de la privatización ferroviaria de 1997, ha mostrado un aumento general en la participación del ferrocarril, aunque el autotransporte sigue aventajando al ferrocarril. Esta circunstancia plantea el problema de buscar posibilidades de aumentar más la participación ferroviaria en el transporte de carga, a través de la revisión de las cargas que actualmente se mueven por carretera, la estimación de los costos de los movimientos y el análisis de los flujos de carga que resultan en el costo mínimo del transporte tanto en la red carretera como en la ferroviaria.

2.3 Hipótesis

El transporte terrestre de carga se modela como una red bimodal que representa las redes carretera y ferroviaria en una sola red conexa, y en la que los flujos se comportan conforme a criterios de costo mínimo acordes con las

características de cada modo, para satisfacer las demandas de transporte solicitadas.

2.4 Objetivo general

Modelar la red de transporte terrestre de carga, usando las redes troncales carretera (federal) y ferroviaria, para estimar los flujos de carga resultantes, con sus correspondientes efectos, bajo distintos escenarios generados conociendo ofertas y demanda de carga en los nodos y características operativas de las redes, utilizando software especializado de planeación del transporte (TransCAD).

2.5 Objetivos particulares

Adaptar el modelo matemático en el problema de asignación de flujos en una red utilizando el software TransCAD, que modela el flujo a costo mínimo, considerando las funciones de impedancia en los arcos de la red y datos sobre movimiento de cargas carretera y ferroviaria en México, derivados de información reciente del Instituto Mexicano del Transporte.

Examinar el comportamiento de flujos de carga en algunos corredores de transporte importantes para estimar las posibles transferencias de carga entre carretera y ferrocarril así como hacer una primera estimación del impacto ambiental en la generación de contaminantes producidos por el transporte de carga.

3. METODOLOGÍA

Resolver el problema de encontrar los flujos de carga con el mínimo costo de mover carga se relaciona directamente con la búsqueda de rutas en las redes de transporte donde se logre el menor costo posible. Para la red ferroviaria, dado que los trenes usan la misma vía, el modelo básico es el de la ruta más corta, donde las distancias y tiempo de recorrido son fijos. En el caso de la carretera, los camiones pueden elegir la ruta que mejor les parezca, esto puede generar la congestión, y el tiempo de recorrido depende de la cantidad de vehículos presentes en la carretera. En este caso el modelo son las funciones de volumen-demora, que representan el tiempo variable de recorrido causado por la congestión. En este capítulo se presentan los conceptos principales de estos modelos básicos.

3.1 El problema de la ruta más corta

El problema de la ruta más corta, ha sido de gran interés en aplicaciones que pueden representarse por medio de una red. Supóngase que a partir de un punto s dentro de una ciudad se quiere ir al punto t . Conociendo la distancia, tiempo o costo de desplazarse entre todos los puntos por los que se puede pasar para ir de s a t , surge la pregunta: ¿cómo ir de s a t en la forma más rápida o económica?

Este tipo de planteamientos llevan al problema de la Ruta Más Corta o al problema de Flujo a Costo Mínimo (en el cual se necesitan flujos constantes), cuyo objetivo es minimizar la distancia, tiempo o costo al viajar entre dos puntos. Existen algunas variantes, como encontrar la ruta más corta entre un punto específico s y todo punto x , o encontrar la ruta más corta entre todo par de puntos. En general, el problema de la Ruta Más Corta se enfoca en minimizar la distancia, el tiempo o el costo entre un origen y un destino.

Continuando con el ejemplo anterior, que busca desplazarse de s a t recorriendo la distancia más corta posible, al problema se le asocia una red $R = [X, A, d]$, donde:

X es el conjunto de nodos o vértices,

A el conjunto de parejas de nodos de X , llamados arcos,

$d: A \rightarrow \mathbb{R}$: $A \rightarrow \mathbb{R}$, donde, para todo $a \in A$, $d(a)$ es la longitud o costo del arco a .

La longitud de una ruta es la suma de todas las longitudes de sus arcos. Un caso especial, es cuando la red tiene arcos de “longitud negativa”, y existen circuitos de longitud negativa en el camino de s a t , lo que plantea un problema no acotado, pues siempre habría una ruta más corta entre s y t , cuando se pasa una vez más por el circuito negativo. Un ejemplo de red con “longitudes negativas” surge en el problema de conversión monetaria de tipos de cambio, pasando por varios tipos de moneda. Al ser el efecto de conversión multiplicativo, la transformación del producto a una estructura aditiva usando logaritmos de los factores de conversión, genera costos negativos cuando el factor de conversión es menor que uno (Dept. of Computer Science (2014)).

Así, para que el problema de la Ruta Más Corta tenga solución, se piden dos condiciones:

- a) Existe al menos un camino de entre todo par de vértices.
- b) No hay circuitos negativos en la red R .

Antes de analizar diferentes formas de solución, se definirán unos conceptos importantes.

El arco $a_{ij} = (x_i, x_j) \in A$ se llama arco dirigido, si permite el flujo sólo en la dirección de x_i a x_j , y no en sentido opuesto. Una red $R = [X, A, d]$, con todos sus arcos dirigidos, se llama red dirigida. Sea $R = [X, A, d]$ una red

dirigida; $s \in X$ se llama raíz de R , si hay al menos un camino de s a cualquier otro nodo $x \in X$. A un árbol que tiene una raíz, le llamaremos arborescencia.

Se presenta la forma general de un problema de la ruta más corta:

$$\min_{s,a} \sum_{a \in A} d(a_i) \quad (1)$$

A continuación se muestran los tres algoritmos más frecuentes para la resolución de este problema: el Algoritmo de Dijkstra, el General y el de Floyd.

3.1.1 Algoritmo de Dijkstra

Este algoritmo, asigna etiquetas a los nodos: temporal y permanente. Aquellos con etiqueta permanente, forman parte de la ruta más corta entre el nodo origen s , y el nodo destino t . Este algoritmo requiere que los arcos tengan costos no negativos, permitiendo que la ruta sólo pase una vez por cada nodo con etiqueta permanente. Si se busca la ruta más corta entre dos nodos cualesquiera, cuando el nodo final sea etiquetado permanentemente, el algoritmo termina.

a) Inicialización. Sea $\pi(s) = 0$, $\pi(x) = \infty$ para todo $x \neq s$, y etiquétense estos nodos como temporales. Sea $p = s$.

b) Actualización de etiquetas. Para todo nodo x sucesor del nodo p con etiqueta temporal, se actualizan las etiquetas como sigue: $\pi(x) = \min\{\pi(x), \pi(p) + d(u)\}$, donde u es el arco $u = (p, x)$. Sea x' el nodo, tal que $\pi(x') = \min\{\pi(x) | \pi(x) \text{ es temporal}\}$. Si $\pi(x') = \infty$, ALTO, no existe una arborescencia de raíz s . En otro caso, marcar la etiqueta $\pi(x')$ como permanente. Haga $p = x'$.

c) i) Si sólo se busca la ruta de s a t , y $p = t$, ALTO, $\pi(t)$ es la longitud del camino más corto. Si $p \neq t$, ir a b).

ii) Si se busca la arborescencia, es decir, las rutas más cortas de s a cualquier otro nodo de X y todos los nodos tienen etiqueta permanente, ALTO, se ha encontrado la longitud del camino deseado. Si existen aún etiquetas temporales, ir a b) (Hernández, 2005).

Ejemplo 1. Encontrar la Ruta más corta del punto s al punto t de la red de la Figura 13:

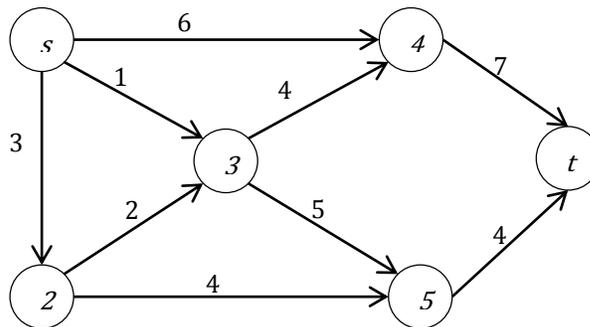


Figura 13. Ejemplo de la red para algoritmo de Dijkstra

Iteración 1. Se tienen que $\pi^p(s) = 0, \pi^T(2) = \infty, \pi^T(3) = \infty, \pi^T(4) = \infty, \pi^T(5) = \infty, \pi^T(t) = \infty$. Se etiqueta a s como permanente y a los demás como temporales, para indicarlo se denota con el súper índice P o T , según sea el caso. Se asigna $p = s$.

Iteración 2. Los sucesores de s con etiquetas temporales, son $\{2,3,4\}$; el valor π de cada uno de estos nodos es: $\pi(2) = \min\{\infty, \pi(s) + 3\} = \min\{\infty, 0 + 3\} = 3$; $\pi(3) = \min\{\infty, \pi(s) + 1\} = \min\{\infty, 0 + 1\} = 1$; $\pi(4) = \min\{\infty, \pi(s) + 6\} = \min\{\infty, 0 + 6\} = 6$, eligiendo la menor de estas distancias, que corresponde al nodo 3, resulta, $x' = 3$, y se marca con etiqueta permanente, quedando, $\pi^p(s) = 0, \pi^T(2) = 3, \pi^p(3) = 1, \pi^T(4) = 6, \pi^T(5) = \infty, \pi^T(t) = \infty$; se asigna $p = 3$.

Iteración 3. Los sucesores de 3 con etiquetas temporales, son $\{4,5\}$, entonces, $\pi(4) = \min\{6, \pi(3) + 4\} = \min\{6, 1 + 4\} = 5$; $\pi(5) = \min\{\infty, \pi(3) + 5\} =$

$\min\{\infty, 1 + 5\} = 6$. De todos los nodos con etiquetas temporales se elige el de la menor distancia desde s , que es el nodo 2, cambiando su etiqueta como permanente, $\pi^p(s) = 0, \pi^p(2) = 3, \pi^p(3) = 1, \pi^T(4) = 5, \pi^T(5) = 6, \pi^T(t) = \infty$, y $p = 2$.

Iteración 4. El único sucesor de 2 con etiquetas temporales, es el nodo 5, para el cual, $\pi(5) = \min\{6, \pi(2) + 4\} = \min\{6, 3 + 4\} = 6$, el nodo temporal cuya distancia es la menor, es el nodo 4, que se etiqueta permanente, $\pi^p(s) = 0, \pi^p(2) = 3, \pi^p(3) = 1, \pi^p(4) = 5, \pi^T(5) = 6, \pi^T(t) = \infty$, y $p = 4$.

Iteración 5. El sucesor t de 4 con etiqueta temporal, cumple $\pi(t) = \min\{\infty, \pi(4) + 7\} = \min\{\infty, 5 + 7\} = 12$. De los nodos con etiqueta temporal, 5 y t , el de menor distancia es el nodo 5, que se etiqueta permanente, y entonces $\pi^p(s) = 0, \pi^p(2) = 3, \pi^p(3) = 1, \pi^p(4) = 5, \pi^p(5) = 6, \pi^T(t) = 12, p = 5$. $\pi^p(s) = 0, \pi^p(2) = 3, \pi^p(3) = 1, \pi^p(4) = 5, \pi^p(5) = 6, \pi^T(t) = 12$.

Iteración 6. El único nodo con etiqueta temporal es t , analizado partiendo desde el nodo 5, $\pi(t) = \min\{12, \pi(5) + 4\} = \min\{12, 6 + 4\} = 10$, se marca este nodo como permanente $\pi^p(s) = 0, \pi^p(2) = 3, \pi^p(3) = 1, \pi^p(4) = 5, \pi^p(5) = 6, \pi^p(t) = 12$, y $p = t$. El algoritmo termina encontrando la ruta más corta de s a t , ver Figura 14.

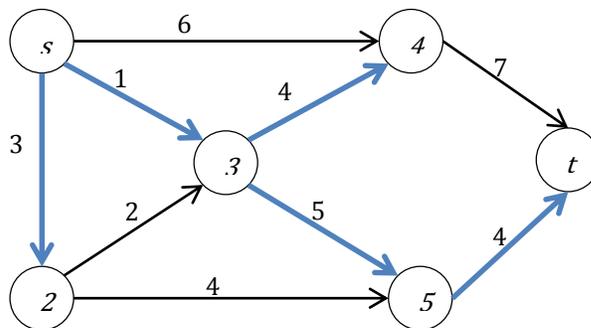


Figura 14. Red resuelta con algoritmo de Dijkstra

La justificación de porqué este algoritmo funciona, se basa en que la red es finita, por lo tanto, el algoritmo termina en un número finito de pasos (Peniche

et al., 2006). Si el algoritmo termina en el paso c), la gráfica generada tendrá $n - 1$ arcos y al nodo s como raíz, y como $\pi(x)$ muestra todas las distancias de las rutas posibles de s a x , se tiene una arborescencia.

Para comprobar que se obtiene la ruta más corta, se usará inducción matemática sobre el número de iteraciones, para probar que las etiquetas permanentes dan las longitudes de las rutas más cortas de s a x , para todo $x \in X$. Esto es evidente en la primera iteración.

Supóngase válido para la iteración k . Sea S_k^P el conjunto de nodos etiquetados de forma permanente y S_k^T el conjunto de nodos etiquetados como temporal en dicha iteración. Al final del paso b) de la siguiente iteración $k + 1$, la etiqueta temporal $\pi^T(x)$, con $x \in S_k^T$, es la longitud más corta del nodo origen s a x , pasando por nodos de S_k^P . Y dado que x' es el nodo con menor distancia en esa iteración, dicho nodo se etiqueta permanentemente.

Ahora, si la ruta más corta de s a x' no estuviera formada sólo por nodos de S_k^P , entonces hay al menos un nodo $x^* \in S_k^T$ y x^* está en el camino de s a x' .

Sin pérdida de generalidad, sea x^* el primer nodo de dicho camino que está en S_k^T ; como todas las longitudes de los arcos son positivas, la longitud l del camino de s a x' , pasando por x^* es no negativa. Al recorrer el camino de s a x' , deteniéndose en x^* , se recorre dicho camino sólo con vértices en S_k^P .

Pero como $\pi(x^*)$ es la longitud de la ruta más corta con todos los predecesores en S_k^P , entonces se tiene que $\pi(x^*) + l < \pi(x') \Rightarrow \pi(x^*) < \pi(x') - l < \pi(x')$, lo cual es una contradicción, pues x^* es el nodo temporal de menor distancia, y se eligió a x' por ser el nodo con la etiqueta temporal más pequeña; la contradicción viene de suponer que la ruta corta tiene nodos fuera de S_k^P .

Por lo tanto, el etiquetado permanente de cualquier nodo, indica que se ha encontrado la distancia más corta de s a x en la iteración $k + 1$.

3.1.2 Algoritmo General

Ya que el Algoritmo de Dijkstra exige que todas las longitudes sean positivas, si en una red hay longitudes negativas, el algoritmo no calcula la ruta más corta, por ejemplo, la red de la Figura 15:

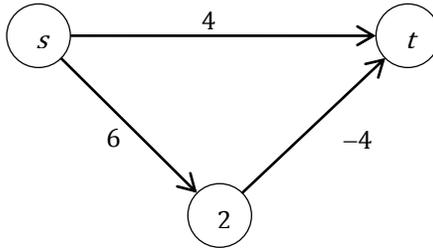


Figura 15. Red del contraejemplo para el Algoritmo de Dijkstra

Para obtener la ruta más corta por el algoritmo de Dijkstra, se procede así.

Iteración 1. Se tienen que $\pi^p(s) = 0, \pi^T(2) = \infty, \pi^T(t) = \infty$. El nodo s se etiqueta como permanente y los demás como temporales, $p = s$.

Iteración 2. Calculando π , para $\{2, t\}$: $\pi(2) = \min\{\infty, \pi(s) + 6\} = \min\{\infty, 6\} = 6$; $\pi(t) = \min\{\infty, \pi(s) + 4\} = \min\{\infty, 0 + 4\} = 4$; se elige a t como el nodo con menor distancia desde el nodo s , y se etiqueta como permanente $\pi^p(s) = 0, \pi^T(2) = \infty, \pi^p(t) = 4$, entonces $p = t$, indicando el fin del algoritmo, es decir, la ruta más corta de s a t , sería yendo de forma directa, sin pasar por el nodo 2. Pero haciendo el recorrido de s al nodo 2 y de éste al nodo t , se tendría una distancia total de $6 + (-4) = 2$. Se tiene una ruta más corta de s a t , **CONTRADICCIÓN.**

Ante este tipo de problemas, se formula el Algoritmo General, que admite cualquier valor en la longitud de los arcos. Este algoritmo tiene los siguientes pasos:

a) Determinar cualquier arborescencia de la red, cuya raíz sea el nodo s . (puede obtenerse por el Algoritmo de Dijkstra).

b) Calcular para todo arco $u = (x, y)$, que no estén en la arborescencia, el coeficiente $\pi(x) + d(u)$. Si se cumple que $\pi(x) + d(u) \geq \pi(y)$, para todo arco $u \in A$, ALTO. Se ha encontrado la arborescencia de caminos más cortos. En caso contrario, se tiene que $\pi(x) + d(u) < \pi(y)$ para algún $u \in A$, ir al paso c).

c) Si $y = s$ ALTO, existe un circuito negativo.

En otro caso, sea $v = (z, y) \in A$ el único arco, que incide en el nodo y , que está en la arborescencia. Sustituir dicho arco por u . Si la gráfica resultante es arborescencia, se actualizan las etiquetas de los vértices \hat{x} , tales que de s a \hat{x} contenga a y como nodo intermedio o final, con $\pi(\hat{x}) = \pi(\hat{x}) - \pi(y) + \pi(x) + d(u)$. Ir a b). En otro caso ALTO, existe un circuito negativo y por lo tanto no hay solución.

La condición de paro del algoritmo es que $\pi(x) + d(u) \geq \pi(y)$, para todo arco $u \in A$. Suponiendo que al final $\pi(y)$, no es la longitud más corta de s a y , para algún vértice y de la red, si existiera más de un nodo con esta condición, se considera al que tiene menor número de arcos en el camino del nodo raíz s a y , con longitud $\pi(y)$. Sea C un camino más corto de s a y , entonces $\pi(C) < \pi(y)$. Sea x el predecesor del nodo y en C . Entonces, $\pi(x)$ es la longitud más corta de s a x , así que si $u = (x, y)$, $\pi(C) = \pi(x) + d(u) < \pi(y)$, lo cual es una contradicción, que viene de suponer que hay una ruta más corta que la encontrada con $\pi(y)$. Por tanto, la arborescencia encontrada con el algoritmo es la ruta más corta (Hernández, 2005).

Ejemplo 2. Se buscará la ruta más corta del nodo s a t de la Figura 16. Una arborescencia para dicha red se encuentra con el algoritmo de Dijkstra como muestra la Figura 17.

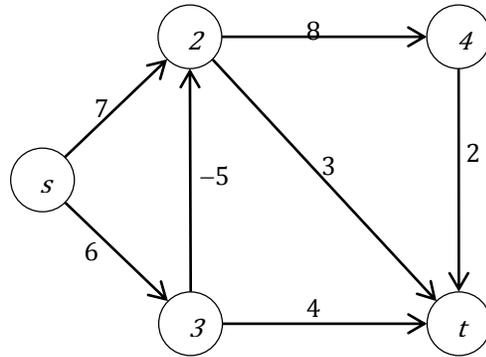


Figura 16. Red de ejemplo 2

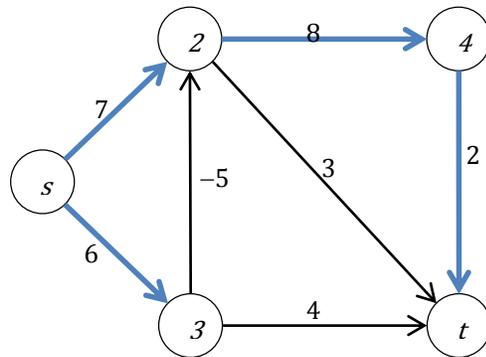


Figura 17. Arborescencia con Algoritmo de Dijkstra

Los arcos de la arborescencia: $(s, 2)$, $(s, 3)$, $(2, 4)$, $(4, t)$, tienen los valores, $\pi(s) = 0, \pi(2) = 7, \pi(3) = 6, \pi(4) = 15, \pi(t) = 17$. Tomando un arco que no esté en la arborescencia, el arco $u = (3, 2)$, se revisa si mejora la distancia al nodo 2: $\pi(3) + d(3, 2) = 6 + (-5) = 1$ que resulta ser menor que $\pi(2)$. Sustituyendo el arco $(s, 2)$ por el arco $(3, 2)$, como indica la Figura 18 se ve cómo se afectan las distancias de los nodos que serían ahora sucesores del nodo 3: $\pi(2) = \pi(2) - \pi(2) + \pi(3) + d(3, 2) = 7 - 7 + 6 + (-5) = 1$, $\pi(4) = \pi(4) - \pi(2) + \pi(3) + d(3, 2) = 15 - 7 + 6 + (-5) = 9$, $\pi(t) = \pi(t) - \pi(2) + \pi(3) + d(3, 2) = 17 - 7 + 6 + (-5) = 11$.

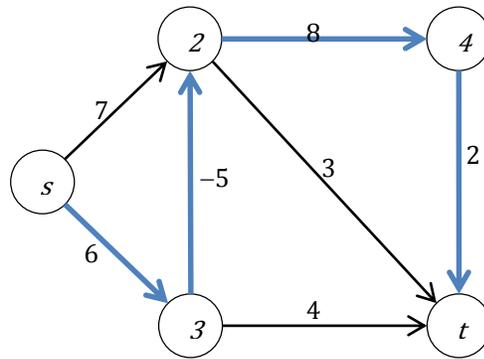


Figura 18. Iteración 1 del Algoritmo General

Ahora, para $u = (2, t)$, se revisa si mejora la distancia a t : $\pi(2) + d(2, t) = 1 + 3 = 4$ que es menor que $\pi(t) = 11$. Se sustituye el arco $(4, t)$ por el arco $u = (2, t)$, y se cambia la distancia a t , $\pi(t) = \pi(t) - \pi(4) + \pi(2) + d(2, t) = 11 - 11 + 1 + 3 = 4$, resultando la Figura 19:

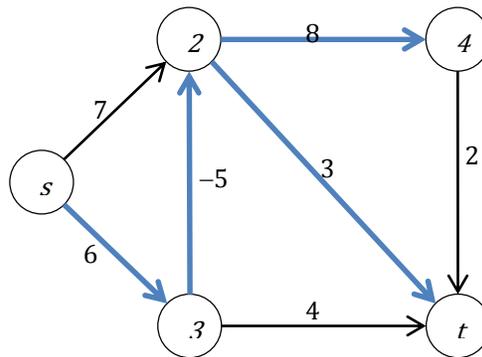


Figura 19. Ruta más corta con el Algoritmo General

Y el algoritmo termina, pues ningún arco fuera de la arborescencia mejora las distancias: para $(s, 2) = \pi(s) + d(s, 2) = 0 + 7 = 7 \geq \pi(2) = 1$, $(3, t) = \pi(3) + d(3, t) = 6 + 10 = 16 \geq \pi(t) = 4$.

3.1.3 Algoritmo de Floyd

Este algoritmo no requiere ninguna condición sobre los arcos; es útil para encontrar la ruta más corta entre todo par de nodos. Se enumeran los nodos

1,2, ..., n, y se utiliza la matriz $D_{n \times n}$, donde cada entrada d_{ij} , al inicio denota la distancia del nodo i a j , si $i \neq j$. En caso de que no exista conexión entre los nodos se pondrá ∞ ; los valores de la diagonal de la matriz $D_{n \times n}$ son 0. En la k -ésima iteración se calcula la longitud de la ruta más corta del nodo i a j , que puede aceptar a los primeros k vértices, o algunos de ellos como vértices intermedios; este número se va almacenando en la entrada d_{ij} de la matriz D .

Así, quedan calculadas las rutas más cortas entre todo par de vértices i, j ; si al final del algoritmo, alguna entrada de la matriz $D_{n \times n}$, es ∞ , esto indica que no hay ruta entre los nodos correspondientes a dicha entrada. En caso en que algún elemento de la diagonal sea negativo, la red tiene un circuito negativo, y no hay solución.

a) Sea $k = 0$, constrúyase la matriz $D_{n \times n}$, de la siguiente forma:

$$d_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{si } i = j \\ d(i, j), & \text{si } (i, j) \in A \\ \infty, & \text{si } (i, j) \notin A \end{cases}$$

b) Hacer $k = k + 1$, para todo nodo $i \neq k$ tal que $d_{ik} \neq \infty$ y para todo $j \neq k$ tal que $d_{kj} \neq \infty$, se calcula $d_{ij} = \min\{d_{ij}, d_{ik} + d_{kj}\}$.

c) i) Si $d_{ii} < 0$ para algún nodo i , ALTO. En la red existe un circuito negativo que contiene a dicho nodo y por lo tanto no hay solución.

ii) Si $d_{ii} \geq 0$, para todo nodo i y $k = n$, ALTO. d_{ij} es la longitud más corta de i a j .

iii) Si $d_{ii} \geq 0$, para todo nodo i , pero $k < n$, ir a b) (Peniche, 2006).

Para recuperar las rutas ente los nodos, se construye una matriz auxiliar A , de dimensión $n \times n$, donde a_{ij} , indicará el predecesor del vértice j en la ruta de i a j , encontrada en cada iteración. Las entradas de A , se inicializan como $a_{ij} = i$,

para todo par de nodos $i, j \in X, i, j \in X$. La matriz será modificada en el paso b) de

cada iteración de acuerdo con:
$$a_{ij} = \begin{cases} a_{kj}, & \text{si } d_{ik} + d_{kj} < d_{ij} \\ \text{no cambia,} & \text{si } d_{ij} < d_{ik} + d_{kj} \end{cases}$$

El algoritmo termina en n iteraciones, ya que la red es finita con n nodos, a menos que termine en i) del paso c), antes de la iteración n . Se mostrará por inducción matemática sobre el número de iteraciones, que el algoritmo da la solución óptima para la ruta entre dos nodos cualesquiera.

En la primer iteración, la entrada d_{ij} de la matriz es la longitud más corta entre los nodos i y j , si ningún vértice intermedio. En el paso b) de esta iteración, se compara la longitud d_{ij} , con la ruta con el nodo 1 como intermedio, es decir, de i a 1 y de 1 a j , $(d_{i1} + d_{1j})$; así se obtiene la ruta más corta, entre los nodos i a j , sin ningún vértice intermedio, o que sólo contiene al 1 como intermedio. Supóngase que se cumple esto para la iteración $k - 1$, donde d_{ij} representa la longitud más corta entre i y j , que contiene a los primeros $k - 1$ nodos como intermedios o alguno de estos nodos. En el paso b) de la iteración k , se compara esta última longitud d_{ij} con la de aquella formada por la unión de las rutas más cortas encontradas en la $k - 1$ iteración, entre i y k y de k a j ; así, al final de la de k -ésima iteración, d_{ij} es la longitud de la ruta más corta, entre i y j , que contiene a los primeros k nodos como intermedios o alguno de ellos. Entonces, en la última iteración n , d_{ij} indica la longitud de la ruta más corta entre los vértices i y j .

Ejemplo 3. Encontrar las rutas más cortas entre los nodos de la red de la Figura 16, renombrando el nodo s por 1 y el nodo t por 5:

Se tiene $k = 0$, con las matrices D y A :
$$D = \begin{pmatrix} 0 & 7 & 6 & \infty & \infty \\ \infty & 0 & \infty & 8 & 3 \\ \infty & -5 & 0 & \infty & 10 \\ \infty & \infty & \infty & 0 & 2 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & 0 \end{pmatrix},$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 5 & 5 & 5 & 5 & 5 \end{pmatrix}.$$

Haciendo $k = 1$, $k = 1$, y como no hay $d_{i1} \neq \infty$, entonces, $k = k + 1 = 2$, y resulta que aquellos $d_{i2} \neq \infty$, son $d_{12} = 7$ y $d_{32} = -5$ y los sucesores de 2, son 4 y 5; se calcula: $d_{14} = \min\{\infty, d_{12} + d_{24}\} = \min\{\infty, 7 + 8\} = 15$; $d_{15} = \min\{\infty, d_{12} + d_{25}\} = \min\{\infty, 7 + 3\} = 10$; $d_{34} = \min\{\infty, d_{32} + d_{24}\} = \min\{-5 + 8\} = 3$; $d_{35} = \min\{10, d_{32} + d_{25}\} = \min\{10, -5 + 3\} = -2$, todas las distancias mejoraron; se sustituye el valor en la matriz D , y se cambian las entradas respectivas de la matriz A , por el valor de 2: $D =$

$$\begin{pmatrix} 0 & 7 & 6 & 15 & 10 \\ \infty & 0 & \infty & 8 & 3 \\ \infty & -5 & 0 & 3 & -2 \\ \infty & \infty & \infty & 0 & 2 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & 0 \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & 3 & 2 & 2 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 5 & 5 & 5 & 5 & 5 \end{pmatrix},$$

$k = k + 1 = 3$, aquellos valores de $d_{i3} \neq \infty$, es $d_{13} = 6$, y con sucesores 2,4,5, se calcula: $d_{12} = \min\{7, d_{13} + d_{32}\} = \min\{7, 6 + (-5)\} = 1$; $d_{14} = \min\{15, d_{13} + d_{34}\} = \min\{15, 6 + 3\} = 9$; $d_{15} = \min\{10, d_{13} + d_{35}\} = \min\{10, 6 +$

$(-2)\} = 4$, haciendo los cambios en la matriz, $D = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 6 & 9 & 4 \\ \infty & 0 & \infty & 8 & 3 \\ \infty & -5 & 0 & 3 & -2 \\ \infty & \infty & \infty & 0 & 2 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & 0 \end{pmatrix}, A =$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & 3 & 2 & 2 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 5 & 5 & 5 & 5 & 5 \end{pmatrix},$$

$k = k + 1 = 4$, aquellos valores de $d_{i4} \neq \infty$, son $d_{14} = 9, d_{24} = 8, d_{34} = 3$, y con sucesor 5, se calcula: $d_{15} = \min\{4, d_{14} + d_{45}\} = \min\{4, 9 + 2\} = 4$; $d_{25} = \min\{3, d_{24} + d_{45}\} = \min\{3, 8 + 2\} = 3$, $d_{35} = \min\{-2, d_{34} + d_{45}\} = \min\{-2, 3 + 2\} = -2$, no se mejora, las matrices quedan igual; se hace $k = 5$ y los $d_{i5} \neq \infty$, son $d_{15} = 4, d_{25} = 3, d_{35} = -2, d_{45} = 2$, pero como no hay ningún $d_{5j} \neq \infty$, el algoritmo termina, con las matrices D y A iguales a las de la iteración anterior.

Entonces, para encontrar la ruta más corta del nodo 3 al 5, la distancia entre ellos es -2 y con el nodo 2 de intermedio, es decir, se va de 3 a 2 y de 2 a 5. Para ir del nodo 1 al 5, como lo hicimos en el ejemplo anterior, la matriz D indica que la distancia más corta es 4, y la matriz A , indica que para ir de 1 a 5, se pasa por el nodo 3, pero del nodo 3 al nodo 5, se pasa por el nodo 2, es decir, se va de 1 a 3, de 3 a 2 y de 2 a 5, que es la ruta encontrada con el Algoritmo General; ver Figura 19.

Se puede ver que tanto el Algoritmo General y el de Floyd resuelven el problema de la ruta más corta para cualquier tipo de red, pero muchas veces el primer algoritmo es tomado para encontrar la ruta desde un punto origen a los demás nodos de la red, mientras que el Algoritmo de Floyd encuentra la ruta más corta entre cualquier par de nodos, por lo que es de utilidad, ya que si la red se satura en un nodo, éste describe la forma de llegar a otro de interés.

Los algoritmos anteriores son muy eficientes, para el usuario de la red, ya que obtienen la ruta más corta (tiempo, costo, distancia).

Ahora supóngase que hay más de un usuario en la red y éstos conocen de alguna forma la ruta más corta, obtenida con cualquiera de los métodos anteriores. A medida que los usuarios usan la misma ruta más corta, se ocasionará congestión en la red, es decir, los mismos usuarios obstaculizan a los demás llegar al destino, y la ruta más corta empieza a ser ineficiente.

Para entender el comportamiento de la red bajo congestión, se utiliza el concepto de las funciones de volumen – demora.

3.2 Funciones de volumen – demora

Una función de volumen demora o función de impedancia de la red, es un modelo matemático de la congestión en las redes de transporte. La idea básica es que la función de volumen-demora muestra cómo aumenta el tiempo necesario para transitar por una ruta a medida que el volumen de usuarios en la misma aumenta.

En la calibración de un modelo de transporte, los parámetros de las funciones de volumen – demora, son esenciales en el ajuste del mismo, con el fin de lograr réplicas realistas de la red (Horowitz, 1991). Las funciones se comportan diferente dependiendo de los niveles de ocupación de la red (Branston, 1976), definida como el volumen (vehículos en el arco) dividido por la capacidad para cada arco de ésta.

Para utilizar las funciones de demora, es necesario calibrar sus parámetros usando datos de los flujos reales de interés. En principio, si se pueden hacer mediciones de las velocidades de circulación vehiculares en un tramo dado, a medida que aumenta el flujo vehicular, se podrá observar la clásica curva que predice el diagrama flujo-velocidad que se discute en la teoría de tránsito en ingeniería de transporte. Un ejemplo se muestra en la Figura 20.

Los puntos en la Figura 20 muestran, en la parte superior de la curva, cómo a medida que aumenta el flujo vehicular la velocidad de circulación inicial de poco más de 100 km/h disminuye hasta llegar al punto de flujo máximo (2,500 veh/h) donde cae a cerca de 80 km/h. Pasado este punto, ya no puede crecer el flujo vehicular, pues se ha alcanzado la capacidad del tramo.

Sin embargo, si flujos vehiculares adicionales intentan entrar al tramo, empiezan a formarse colas y los conductores empiezan a tener dificultades para moverse, lo que ocasiona el comportamiento caótico que lleva a tener puntos en la parte inferior de la curva, marcados como “condiciones de flujo forzado” donde ocurre que a pesar de que los flujos son menores al máximo, las velocidades disminuyen aún más.

La utilidad de esta clase de datos es que permiten estimar los tiempos de recorrido del tramo (del que se sabe su longitud) a partir de las velocidades antes de saturación, con lo cual se podrían calibrar las funciones de demora con algún procedimiento estadístico adecuado. Ahora bien, el llevar a cabo estas mediciones no siempre es fácil, pues se requiere de recursos, personal, aparatos de medición, y sobre todo, de presupuesto.

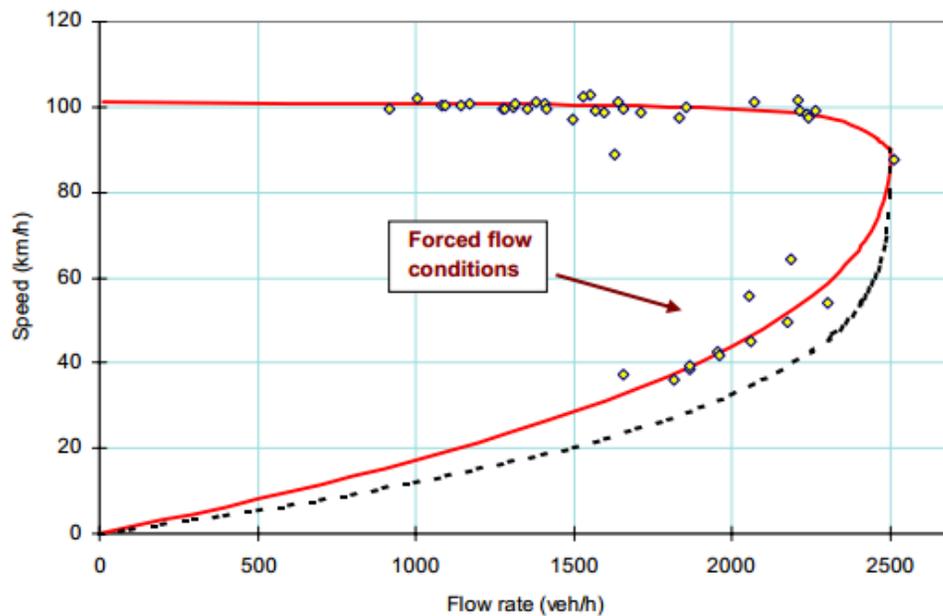


Figura 20. Velocidades medidas y estimadas como función de la tasa de flujo en la Eastern Freeway en Melbourne, Australia (incluyendo condiciones de flujo forzado) (Akcelik, 2013)

Las limitaciones de datos para calibrar funciones de demora, sin embargo, pueden reducirse haciendo un análisis básico de las funciones de demora y de la interpretación de sus parámetros como se muestra a continuación

Tres de las funciones más usadas para el modelaje de transporte, son: la función BPR; la función cónica de demoras (Spiess, 1997) y la función de Akcelik (Akcelik R., 1991; Dowling and Skabardonis, 2006). Con base a éstas, se han hecho modificaciones para resolver problemas particulares (Caliper, 2012).

En esta sección se describen estas funciones, los parámetros que las definen, y se ilustra su comportamiento en los niveles de saturación; por último, se muestra una comparación entre las funciones.

3.2.1 Función BPR

En la mayoría de los métodos de asignación de tránsito, el efecto de la congestión en la red en los tiempos de viajes es especificado por medio de las funciones de demora $t(v)$, las cuales se utilizan para expresar el tiempo de viaje (o costo) en el arco en función del volumen de tránsito v (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2010). De forma general estas funciones se expresan como producto del tiempo de tránsito en flujo libre multiplicado por una función de congestión normalizada $f(x)$:

$$t(v) = t_0 \cdot f\left(\frac{v}{c}\right) \quad (2)$$

donde c es una medida de la capacidad de la red y $\left(\frac{v}{c}\right)$ es el argumento para la función de impedancia (Jastrzebski, 2000).

Varios tipos de función de demora han sido propuestas y empleadas en la práctica. Una de las más usadas es la función de la Oficina de Caminos Públicos norteamericana, llamada función BPR (Bureau of Public Roads), que fue planteada en 1965 y está definida como sigue:

$$f_{BPR}(x) = t_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{v}{c}\right)^\beta\right), \quad (3)$$

donde, $f_{BPR}(x)$ es el tiempo de travesía del tramo (arco) bajo congestión.

v el volumen de tránsito (número de vehículos) presente en el arco,
 x el nivel de saturación, es decir, $x = \frac{v}{c}$,
 c es la capacidad máxima (número de vehículos) del arco,
 t_0 es el tiempo de travesía del tramo sin congestión (free-flow time),
 α, β son los parámetros para calibrar el modelo.

De la definición de la función BPR, α puede interpretarse como el porcentaje del incremento de t_0 , el tiempo de travesía del tramo sin congestión, cuando la saturación es alcanzada, es decir, cuando $x = 1$:

$$f_{BPR}(1) = t_0(1 + \alpha), \quad (4)$$

Para entender el significado del otro parámetro β , es conveniente calcular la elasticidad de la función, la cual se define como la relación del porcentaje de cambio en la función, entre el cambio de porcentaje de cambio en la variable, que se define como sigue:

$$E_f(x) = \frac{x}{f(x)} \cdot \frac{df(x)}{dx} \quad (5)$$

Entonces la elasticidad de la función BPR, es:

$$E_{f_{BPR}}(x) = \beta \frac{\alpha x^\beta}{1 + \alpha x^\beta}, \quad (6)$$

de donde

$$\beta = \frac{1 + \alpha x^\beta}{\alpha x^\beta} E_{f_{BPR}}(x), \quad (7)$$

y cuando $x = 1$:

$$\beta = \frac{1 + \alpha}{\alpha} E_{f_{BPR}}(1), \quad (8)$$

Teniendo entonces que β es la elasticidad de la BPR en el punto de saturación multiplicado por el factor $\frac{1 + \alpha}{\alpha}$.

La aplicación de la función más común es con los parámetros de $\alpha = 0.15$ y de $\beta = 4$, por razones históricas del desarrollo de la fórmula en aplicaciones de ingeniería de tránsito en áreas urbanas. En los Estados Unidos se han obtenido valores distintos de α y β para autopistas (Freeways) y para carreteras multicarril (Multilane); estos se muestran en la Tabla 3-2 para autopistas, y en la Tabla 3-3 para carreteras multicarril, para varias velocidades de diseño (NCHRP, 1998)

Una carretera multicarril es una carretera principal uniendo dos o más destinos y con 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 de flujo como semáforos a una distancia de al menos tres kilómetros, generalmente están en zonas suburbanas que conducen a ciudades principales o corredores rurales de gran volumen de tránsito. Por lo general, son vías libres de peaje. En cambio, las autopistas son carreteras que se separan del resto del tránsito y sólo se puede ingresar o salir de ellas por medios controlados, tienen rampas de entrada y salida que permiten cambios de velocidad entre la autopista y las vías auxiliares, no tienen intersecciones a nivel y en México pueden ser vías de peaje, por ejemplo la autopista México – Querétaro.

Tabla 3-2. Parámetros de la función BPR para autopistas norteamericanas (NCHRP, 1998)

Autopistas

Parámetro	70 mph 113 km/h	60 mph 97 km/h	50 mph 81 km/h
α	0.88	0.83	0.56
β	9.8	5.5	3.6

Tabla 3-3. Parámetros de la función BPR para carreteras multi-carril norteamericanas (NCHRP, 1998)

Multi-carril

Parámetro	70 mph 113 km/h	60 mph 97 km/h	50 mph 81 km/h
α	0.88	0.83	0.56
β	9.8	5.5	3.6

α	1	0.83	0.71
β	5.4	2.7	2.1

Para entender el comportamiento de los parámetros de la función BPR, a continuación se muestran dos gráficas con valores altos para α y β , en ambas se tomó $t_0 = 1$. La Figura 21, muestra qué sucede cuando se fija el parámetro de $\alpha = 0.15$ y se da a β los valores 2, 4, 6 y 8.

En la Figura 22, se fija el valor $\beta = 4$, y se asignan los valores de 0.1, 0.15, 0.3 y 0.45 para α . Como se ve en las figuras, los efectos de la congestión se vuelven más notorios, ya que el tiempo de travesía aumenta de forma importante en ambos casos.

Por la Figura 21, se ve, que mientras mayor sea el parámetro β mayor será el incremento de la función en el tiempo, esto es causado porque la definición del parámetro depende de la elasticidad de la función. Para el parámetro α sucede lo mismo, sólo que el incremento es gradual en la creciente de la función, ya que este es el incremento de tiempo cuando el tramo tiene un flujo igual a su capacidad, como observa en la Figura 22.

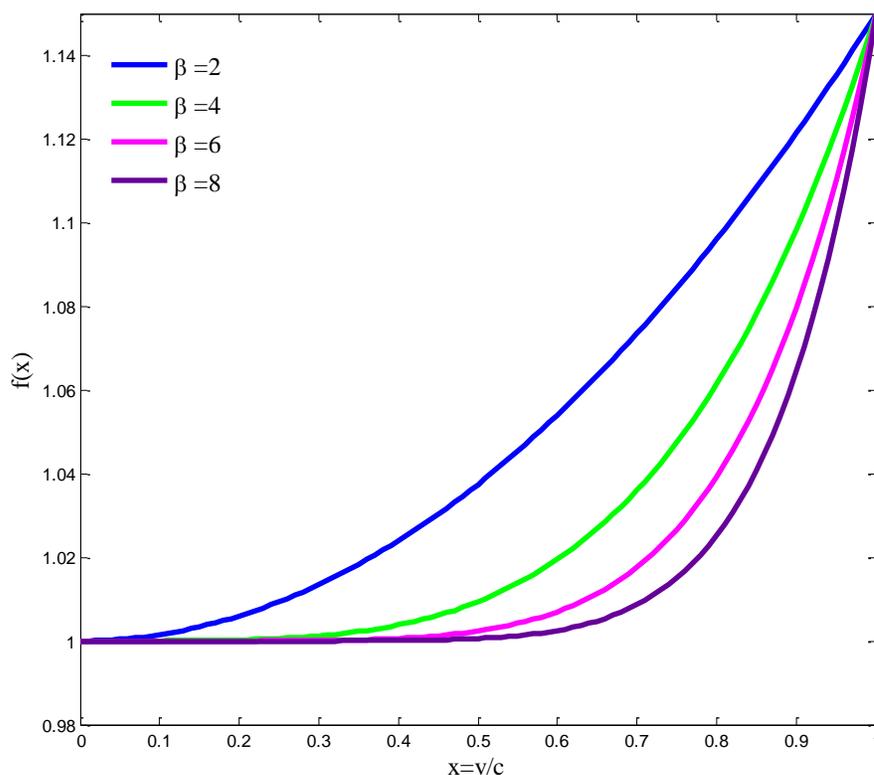


Figura 21. Función BPR con diferentes niveles de β y $\alpha = 0.15$.

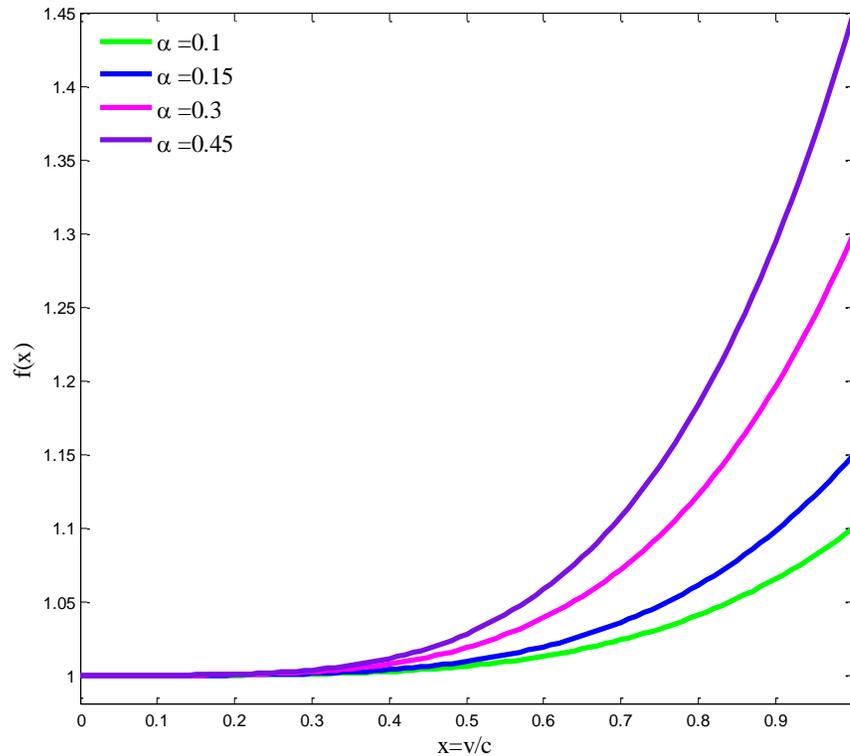


Figura 22. Función BPR con diferentes niveles de α , con $\beta = 4$.

La simplicidad de la función BPR hace que sea muy sencilla de entender y de usar. Una característica deseable para la función es que $f_{BPR}(1) = 2$, es decir, cuando el volumen del tránsito es igual a la capacidad, se duplique el tiempo de tránsito comparado al caso de flujo sin congestión. Desgraciadamente la función BPR tiene los inconvenientes que se citan enseguida, sobre todo cuando se usan valores altos para β (Spiess, 1997):

a) Mientras que para cualquier conjunto realista de volúmenes de viaje, se puede suponer que $\frac{v}{c} \leq 1$ (o al menos no más grande que 1) esto usualmente no ocurre durante las primeras iteraciones del algoritmo que busca los flujos de equilibrio a costo mínimo (el proceso llamado de asignación bajo equilibrio). Los valores de $\frac{v}{c}$ pueden alcanzar valores por encima de 2, aunque esto en la práctica no es recomendable porque hace que la convergencia sea lenta, dándole un peso erróneo a los arcos con sobrecarga con valores β altos y puede ser la causa de problemas numéricos, como la falta de precisión.

b) Para los arcos que son usados mucho menos que su capacidad, las funciones BPR, especialmente para valores altos de β , producen siempre tiempos de flujo independientes del volumen de tránsito actual, es decir, no importando que el volumen sea 0 o 1000, la función siempre dará como respuesta el mismo valor, perdiéndose la modelación del efecto de congestión. Es por eso, que el modelo de equilibrio degenerará localmente a una asignación de todo o nada, donde el menor cambio (o error) en el tiempo de flujo libre puede resultar en un cambio completo de volumen de un camino a otro. Además, la solución puede no ser única en los niveles de los flujos de los arcos, ya que la función de demora deja de ser estrictamente creciente.

c) A pesar de que la función BPR es simple, su evaluación numérica requiere de una cantidad considerable de cálculos, ya que debe computarse tanto una función logarítmica como una exponencial para estimar el valor de $\left(\frac{v}{c}\right)^n$.

Estos problemas motivaron el planteamiento de otras funciones de impedancia. A continuación se presentan dos que son de bastante uso en el modelaje de transporte.

3.2.2 Función de Akcelik

La función de Akcelik es de interés porque no es una curva suave, como la BPR, sino que es casi lineal. La ecuación es sensible a la longitud del arco, además de ser más sensible al nivel de saturación $x = \frac{v}{c}$ que la función BPR. Esta función asigna la misma demora a un arco para $\frac{v}{c}$, a pesar de la longitud del arco (bajo el supuesto de que todos los retrasos ocurren en alguna señal de tránsito o al final del arco). El resultado es que la función de Akcelik muestra los datos más dispersos que otras funciones de impedancia que no son sensibles a la longitud de los arcos (Dowling, Skabardonis, 2006).

La función de Akcelik es definida como sigue:

$$f(x) = t_0 + \left\{ 0.25T \left[(x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{16J_a L^2 x}{T^2}} \right] \right\}, \quad (9)$$

donde $f(x)$ es el promedio de tiempo de viaje por unidad de distancia (horas /milla),

x el grado de saturación, es decir, $\frac{v}{c}$,

v el volumen de tránsito en el arco,

L la longitud del arco,

t_0 es el tiempo de flujo libre por unidad de distancia (horas/milla),

T es el periodo de flujo, es decir, el intervalo de tiempo en horas, durante el cual el promedio de flujo de llegada (demanda) v persiste,

J_a el parámetro de demora (Akcelik R., 1991).

En esta función el parámetro a calibrar es J_a , y para valores pequeños la función muestra mayor tiempo de viaje que para valores grandes. Es importante hacer notar que mientras que el parámetro se mantenga en valores pequeños, la curva será más suave, ya que por ejemplo, para $J_a = 25$, la curva muestra un punto de viraje, que hace que la función pase de casi constante a creciente,

cuando el grado de saturación se aproxima a 1, esto se puede ver en la Figura 23, obtenida con los valores de $T = 3$.

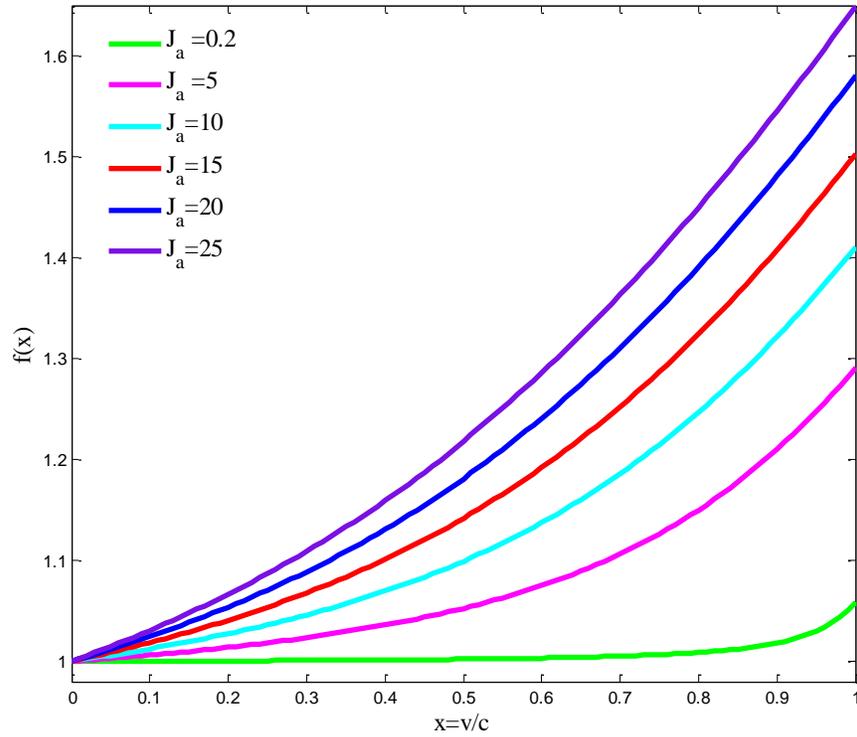


Figura 23. Función de Akcelik con diferentes valores de J_a

Para interpretar J_a , es necesario calcular la elasticidad en $x = 1$:

$$f(1) = t_0 + L\sqrt{J_a}, \quad (10)$$

Entonces, J_a resulta ser:

$$J_a = \left(\frac{f(1) - t_0}{L} \right)^2, \quad (11)$$

Por lo que el parámetro J_a se expresa como:

$$J_a = \left(\frac{f(1)}{L} - \frac{t_0}{L} \right)^2 = \left(\frac{1}{L/f(1)} - \frac{1}{L/t_0} \right)^2, \quad (12)$$

Que es el cuadrado de la diferencia de los recíprocos de la velocidad en el nivel de saturación menos saturación en el flujo libre.

3.2.3 Función cónica de demora

En el planteamiento de otras funciones de impedancia, se han sugerido como deseables las siguientes condiciones derivadas de la función BPR (Spiess, 1997):

a) $f(x)$ es estrictamente creciente, esta condición es necesaria para que la asignación converja a una solución única.

b) $f(0) = 1$ y $f(1) = 2$ para algún valor de α y β , estas condiciones aseguran la compatibilidad con la función del estilo BPR. La capacidad sigue estando definida como el volumen en el que la velocidad bajo congestión es la mitad de la velocidad del flujo libre, siempre y cuando $t_0 = 1$.

c) $f'(x)$ existe y es estrictamente creciente. Esto asegura la convexidad de la función de congestión, esta característica no es necesaria, pero si es una propiedad deseada.

d) $f'(1) = \beta$, β es, similar al exponente en la función BPR, es el parámetro que define cuán rápido cambian los efectos de la congestión cuando la capacidad alcanza, ya que cuando $\alpha = 1$, $f'_{BPR}(1) = \beta$.

e) $f'(x) < M\beta$, donde M es una constante positiva. La pendiente de la curva de congestión es limitada. Esto a su vez limita también los valores de la función de volumen – demora a no tener valores muy altos cuando se considera que $\frac{v}{c} > 1$.

f) $f'(0) > 0$. Esta condición garantiza unicidad de los volúmenes en los tramos. Además hace a la asignación estable respecto a errores ligeros de codificación en el tiempo de viaje y distribuye el volumen en caminos alternos sin congestión, en proporción a su capacidad.

g) La evaluación de $f(x)$ no debería tomar más tiempo computacional que la de la correspondiente función BPR.

Ahora, considérese un cono intersecado con un plano XY. Las curvas de proyección del cono, forman una posible sección hiperbólica. Estas secciones hiperbólicas cónicas cumplen todas las propiedades presentadas anteriormente y constituyen la base para las funciones de congestión cónica.

Por eso mismo suele nombrarse a estas funciones como de congestión hiperbólica, pero algunas veces cuando se usan funciones de impedancia del tipo $f_{HIP} = \frac{1}{1-x}$, puede haber confusión. Además que puede también causar confusión con las funciones hiperbólicas trascendentales (Spiess H., 1997).

La clase de funciones de congestión cónicas, se definen como:

$$f_C(x) = 2 + \sqrt{\alpha^2(1-x)^2 + \beta^2} - \alpha(1-x) - \beta \quad (13)$$

donde, x es el nivel de saturación del arco $x = \frac{v}{c}$, $\beta = \frac{2\alpha-1}{2\alpha-2}$, $\alpha \geq 1$, el parámetro a calibrar de la función.

Con esta función sucede algo similar que con la función BPR, para una saturación menor a 1, el parámetro α con valores pequeños muestra mayor tiempo de viaje. Esto se puede ver en la Figura 24, donde $\alpha = 2, 4, 6, 8, 10, 12$, con saturación menor a 1.

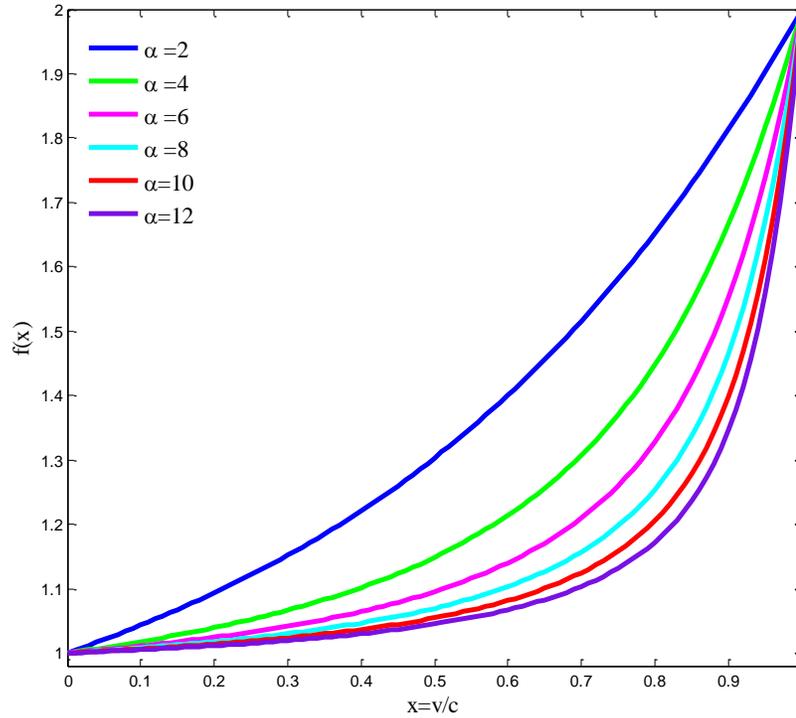


Figura 24. Función cónica de demora con distintos valores de α .

Para obtener una interpretación del parámetro α de la función cónica, se utiliza la elasticidad de esta función, la cual es como sigue:

$$E_{f_c}(x) = \frac{\alpha x [\sqrt{\alpha^2(1-x)^2 + \beta^2} - \alpha(1-x)]}{\sqrt{\alpha^2(1-x)^2 + \beta^2} [2 + \sqrt{\alpha^2(1-x)^2 + \beta^2} - \alpha(1-x) - \beta]}, \quad (14)$$

Para los valores de $x = 0$, $E_{f_c}(0) = 0$, $x = 1$, $E_{f_c}(1) = \frac{\alpha}{2}$, lo que hace que:

$$\alpha = 2E_{f_c}(1), \quad (15)$$

La ecuación (14) indica que α es el doble de la elasticidad en el nivel de saturación de flujo en el arco.

3.2.4 Comparación entre funciones

Comparando las funciones con los parámetros usuales, con un nivel de saturación menor a 1, la función de Akcelik es la que menos crece, a pesar de que cuando se acerca a 1, tiende a crecer ligeramente.

Las funciones BPR y cónica, se comportan como una función creciente, la cónica tiene una pendiente más pronunciada que la BPR, la cual crece de forma lenta; de hecho, la función BPR y de Akcelik al principio parecen dar el mismo tiempo de travesía para niveles de saturación pequeñas, esto puede ser observado en la Figura 25, donde la BPR tiene parámetros $\alpha = 0.15, \beta = 4$; $T = 3, J_\alpha = 0.4$ para la función de Akcelik; $\alpha = 4$ para la función cónica de demora.

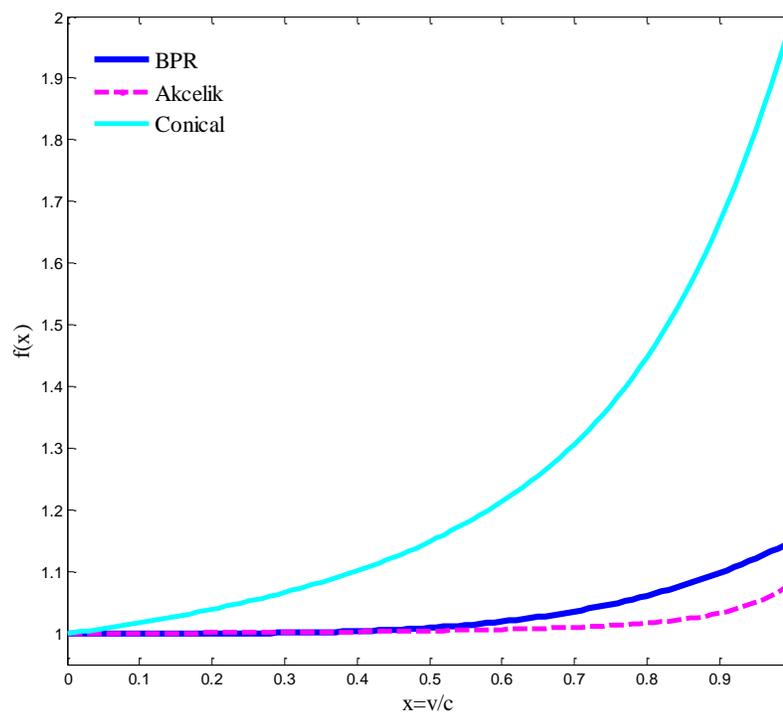


Figura 25. Funciones de volumen – demora con saturación menor a 1.

Los parámetros de la función cónica de demora y la BPR son muy similares, de hecho, las similitudes pueden ser observadas en la

Figura 21 y la Figura 24, donde para valores altos del parámetro, menor tiempo de travesía; en la Figura 22, el tiempo registrado en la función BPR es menor que la cónica, y la diferencia de las pendientes es significativa.

La función de Akcelik, toma en cuenta la longitud del arco y el tiempo en horas, mientras el flujo con cierto volumen de llegada persiste. Esta función se comporta casi constante y crece cuando la saturación es mayor; en algunos intervalos esta función se comporta casi como la BPR y la cónica, pero nunca tiene una pendiente tan pronunciada como la BPR y mucho menos como la cónica, es por esto, que el tiempo de travesía registrado siempre será menor a las otras dos funciones.

3.3 Criterios de optimalidad

Los algoritmos de ruta más corta explicados anteriormente, encuentran la ruta más corta mientras se cumplan las hipótesis de cada uno, y dan la solución óptima para un usuario que viaja por la red. Como se observó ya también, un nuevo problema se presenta cuando varios usuarios buscan ir del mismo nodo origen al nodo destino, ya que varios estarían usando la misma ruta y comenzarían a obstruirse uno al otro, por lo que la ruta más corta perdería optimalidad. Ante la congestión, los usuarios de la red comienzan a buscar vías alternas (resuelto por el Algoritmo de Floyd) y el problema ahora es buscar la mejor ruta, dada la congestión de las rutas. Para abordar este problema, J.G.Wardrop, analizó y formalizó estas ideas y las enunció en dos principios.

3.3.1 Primer principio de Wardrop

“En condiciones de equilibrio en una red congestionada, el tránsito se acomoda de modo que todas las rutas utilizadas en un par Origen – Destino dado tienen el mismo costo mínimo, mientras que las rutas que no se usan tienen costos iguales o mayores” (Ortúzar, Willumsen, 2011).

El costo está dado por el tiempo en que el usuario tarda en recorrerla y el principio indica, que en el equilibrio, ningún usuario ahorrará tiempo, aunque decida cambiar de ruta, básicamente cuando ningún usuario tiene ventaja al cambiar de ruta. El costo mínimo descrito en este principio, se le conoce como Óptimo del Usuario (OU).

La formulación matemática del OU fue planteada por Beckman, McGuire y Winsten en 1956. Considera el tiempo t necesario para cruzar un arco $a = (i, j)$ en la red vial como una función creciente del volumen vehicular v que cruza por este arco; es la llamada función de impedancia en el arco a . Conociendo las impedancias $C_k(v)$ para los M arcos que conforman la red, y el número de vehículos N_k que parten de r orígenes a r destinos en la red, la formulación matemática busca minimizar la suma de áreas bajo las curvas de impedancia de los tramos de la red: $\min \sum_{n=1}^M \int C_n(u) du$. Con las restricciones de que la suma de los vehículos N_r que salen de los orígenes sea la misma que la que llega a sus destinos y que esas cantidades N_r sean no negativas.

3.3.2 Segundo principio de Wardrop

“En condiciones de equilibrio social en una red congestionada, el tránsito debería acomodarse de manera que el costo promedio o el costo total de los usuarios sean mínimos” (Ortúzar, Willumsen, 2011).

Este principio, a diferencia del primero, no se basa en las decisiones del usuario, si no en la visión de quien administra la red, de tal forma que los costos de los usuarios (el total o el valor promedio) sea el menor posible, para minimizar las emisiones contaminantes, ruido, gasto en combustible, etc., éste se da cuando el tiempo total de todos los recorridos es mínimo. El equilibrio con este enfoque, es llamado Óptimo Social (OS).

La formulación matemática en este caso es similar a la de del OU, con las mismas restricciones pero considerando el objetivo de minimizar los costos (tiempos) totales: $\min \sum_{n=1}^M u_n C_n(u_n)$. Los flujos de la solución del OS logran que

el costo mínimo total, lo que implica minimizar el uso de combustibles, la contaminación, el ruido y otros efectos no deseados del tránsito vehicular. (Moreno, 2008)

Por lo que el modelo general de optimización para el equilibrio del usuario, es:

$$\min \sum_{n=1}^M \int C_n(u) du \quad (16)$$

$$s. a. \sum_{k=1}^r N_k = N$$

Y para el equilibrio del sistema, es:

$$\min \sum_{n=1}^M u_n C_n(u_n) \quad (17)$$

$$s. a. \sum_{k=1}^r N_k = N.$$

3.3.3 Ejemplo básico de aplicación de los principios de Wardrop

Suponga que se desea ir de una ciudad “A” a la ciudad “B” y se conocen dos caminos distintos, el “camino 1” es de una distancia de 40 kilómetros, la velocidad permitida es 60 km/h, por lo que el tiempo de recorrido es 40 minutos cuando el flujo es poco; el “camino 2”, tiene distancia 55 kilómetros, con velocidad de 100 km/h, por lo que el tiempo de traslado con flujo libre es de 33 minutos. Entonces se tiene que el camino 1 es más corto en distancia, pero el camino 2 es más rápido, como se ve en la Figura 26.

Ahora, suponga además que el flujo incrementa en la red, y que la entrada de cada auto aumenta el recorrido de la ruta 5 y 8 segundos, para el camino 1 y 2 respectivamente.

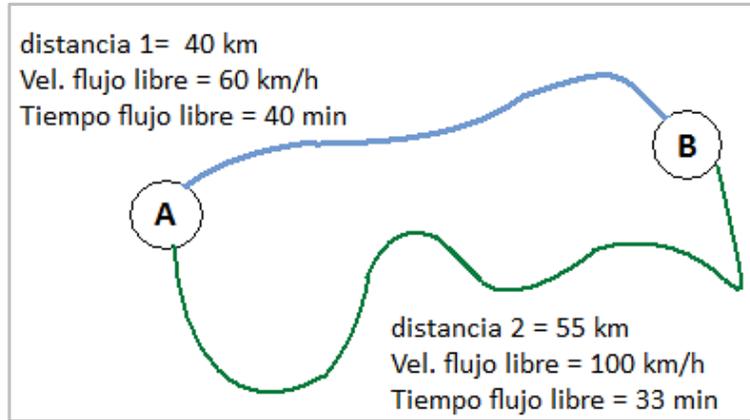


Figura 26. Caminos de ciudad "A" a "B"

En el caso en que entre un número N de vehículos, entonces se tendrían las siguientes funciones para el tiempo de recorrido de A a B:

$$T_1 = 40min + (5 \text{ seg})N = \left(\frac{2}{3} + \frac{N}{720}\right) hr \Rightarrow Vel_1 = \frac{40km}{\left(\frac{2}{3} + \frac{N}{720}\right)hr} = \frac{28800}{480+N} km/hr,$$

$$T_2 = 33min + (8 \text{ seg})N = \left(\frac{11}{20} + \frac{N}{450}\right) hr \Rightarrow Vel_2 = \frac{55km}{\left(\frac{11}{20} + \frac{N}{450}\right)hr} = \frac{49500}{495+N} km/hr .$$

El costo de usar las rutas, visto como el tiempo en horas de recorrido de cada una, es: $C_1 = \frac{2}{3} + \frac{N}{720}$, $C_2 = \frac{11}{20} + \frac{N}{450}$.

Ahora, si se tiene que el número de vehículos en la red es $N=800$, al plantear el problema para el Primer Principio de Wardrop, y resolverlo con el Solver de Excel, para el cálculo del OU se obtiene lo siguiente:

$$\min W = \int C_1(u)du + \int C_2(u)du = \int \frac{2}{3} + \frac{N_1}{720} dN_1 + \int \frac{11}{20} + \frac{N_2}{450} dN_2$$

$$= \frac{2}{3}N_1 + \frac{N_1^2}{1440} + \frac{11}{20}N_2 + \frac{N_2^2}{900}$$

s. a.

$$N_1 + N_2 = 800,$$

$$N_1, N_2 \geq 0$$

En la red deben transitar 460 vehículos por el camino 1 y 340 por el camino 2, es decir, $N_1 = 460, N_2 = 340$, por lo que el costo total, sería de $C_1(460) = C_2(340) = \frac{47}{36} hr = 1.3055 hr = 1 hr 18 min 19 seg$. Con lo que los 800 vehículos emplean $800 \times 1.3055 hr = 1044 h 24 min$ en realizar sus viajes.

Si se plantea, por otro lado, el Segundo Principio de Wardrop, y resolviendo con Solver, se llega a que 476 vehículos deben circular por el camino 1 y 324 por el segundo camino:

$$\min Z = C_1(N_1)N_1 + C_2(N_2)N_2 = \frac{2}{3}N_1 + \frac{N_1^2}{720} + \frac{11}{20}N_2 + \frac{N_2^2}{450}$$

s. a.

$$N_1 + N_2 = 800,$$

$$N_1, N_2 \geq 0$$

Con costos respectivos de $C_1(476) = 1.3277 hr = 1 hr 19 min 39 seg$ para la primer ruta y de $C_2(324) = 1.27 hr = 1 hr 16 min 12 seg$ para la segunda, como se observa los costos resultaron ser diferentes.

Entonces el costo total, es de $(476 \times 1.3277 hr) + (324 \times 1.27 hr) = 1043.46 hr = 1043 hr 27 min 36 seg$, este tiempo total resulta ser menor que el costo de 1044 h 24 min del OU, por lo que el planificador de la red debe motivar a los usuarios a usar la distribución obtenida del OS.

Los criterios de equilibrio mencionados son una parte importante en el esquema de modelación del reparto modal del movimiento de carga entre carretera y ferrocarril.

Una primera idea al respecto es que los usuarios de la carretera tienen mucha libertad para elegir sus rutas, y además lo pueden hacer independientemente, sin consultarse entre ellos. Este rasgo del movimiento carretero sugiere entonces usar el equilibrio del usuario para buscar las rutas de costo mínimo bajo congestión.

En el transporte ferroviario, en cambio, el movimiento de los trenes es mucho más controlado, y no se tiene la libertad del autotransportista de cambiar de rutas, por tanto no se tiene la congestión típica de las carreteras. En el caso ferroviario, entonces, la idea será utilizar la elección clásica de ruta más corta, que en el proceso de asignación de flujos se conoce como “todo o nada” problema que se puede resolver como uno del tipo de flujo a costo mínimo, ya que los arcos tienen flujos constantes.

Los detalles de la modelación se muestran en el capítulo siguiente.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestra el desarrollo del modelo de la red de transporte de carga terrestre con los datos disponibles.

4.1 Modelo de asignación

El modelo de cuatro etapas de la planeación del transporte, se divide en:

1. Generación de viajes,
2. Distribución,
3. Elección modal y,
4. Asignación.

Para la etapa de asignación se utiliza una matriz origen-destino (OD) de viajes en una red de transporte y se toma en cuenta una medida para representar la dificultad o costo de cruzar por los arcos y para así poder pronosticar los flujos de la red. Ortúzar y Willumsen (2011) señalan que entre otros resultados de interés para la planeación de una red de transporte, está el estimar medidas agregadas en la red (flujos totales, tiempo empleado en el movimiento de la red, toneladas movidas, etc.), estimar costos o tiempos en zonas determinadas de la red tomando en cuenta un nivel de demanda, estimar la congestión de arcos, pronosticar el uso de arcos o una ruta en particular para la matriz OD.

El modelado de la congestión o impedancia en un arco, se hace por medio de las funciones de volumen-demora para estimar los flujos en la red. Las más comunes son las mencionadas en la sección 3.2. En la Tabla 3-2 y Tabla 3-3 se muestran valores de los parámetros α y β de la función BPR en autopistas y carreteras multicarril norteamericanas para distintas velocidades de diseño.

Tomando como referencia los valores α y β de la función BPR en los EE.UU., y dado que las carreteras de México tienen condiciones de operación promedio más limitadas que sus correspondientes norteamericanas, en la modelación se usaron los valores norteamericanos de α y β para las carreteras de

menor especificación de diseño (velocidades de diseño de 60 y 50 mph); estos valores se muestran en la Tabla 4-4:

Tabla 4-4. Valores de α y β para fines de la modelación

Parámetro	Autopista		Multicarril	
	60 mph 100 km/h	50 mph 80 km/h	60 mph 100 km/h	50 mph 80 km/h
α	0.83	0.56	0.83	0.71
β	5.5	3.6	2.7	2.1

Determinados los valores de los parámetros de las funciones de volumen-demora, en la asignación se supone que el usuario del modo carretero puede elegir la ruta que más le convenga, buscando evitar la congestión. Al combinarse las decisiones de todos los usuarios, la congestión en las rutas alternas empieza a manifestarse, y como menciona el Primer Principio de Wardrop, se llega al punto donde la red congestionada presenta los mismos tiempos de tránsito en cualquiera de las rutas utilizadas, es decir se llega al equilibrio del usuario en el que ya no es posible mejorar los tiempos de recorrido en las rutas.

Para el usuario ferroviario, el procedimiento es distinto, ya que no puede cambiar de rutas, entonces se toma en cuenta la asignación *todo o nada*, en la cual se transita o no por un arco de la red, y una gran ventaja, es que no se toman en cuenta los efectos de congestión, esto en la matriz OD representa que para cada arco se tienen los mismos costos (tiempos) y atributos del camino para cada par OD.

Tanto el equilibrio del usuario, como la asignación todo o nada, están implementados en el software TransCAD, y cuenta con los algoritmos necesarios para la asignación de flujos por estos criterios.

El algoritmo del software TransCAD utiliza el modelo de asignación multimodo multiclase, en el que se considera otras variables o restricciones para el

tipo de carga, y se presenta la siguiente función de costo generalizado (Caliper, 2007):

$$gc_{OD}^m = \sum_{i \in A_{OD}^m} \{VOT^m \cdot VDF(t_a, c_a, x_a) + FT_a^m\} + \sum_{m \in M_{OD}^m} MT_m^i \quad (18)$$

donde:

- gc_{OD}^m costo generalizado entre el par OD 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 $\sum_m (PCE^m x_a^m)$,
- 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 (VOT^m) es igual a 1 en ambos modos, dado que no se cuenta con la información suficiente para calcular el valor por cada modo.

4.2 Restricciones de la modelación

Definidas las funciones a utilizar en el modelo, se plantean las restricciones del mismo, bajo las siguientes premisas:

- El usuario elige el modo para transportar su carga dependiendo de lo que más le convenga, ya sea en distancia, costo o tiempo, obteniendo así, el costo de operación por modo para cada par O-D.
- El modo de transporte utilizable puede depender del tipo de producto, ya que algunos productos no se podrán mover por ferrocarril debido a su naturaleza.
- Para distancias cortas (menores a 400 km), se utilizará el autotransporte, ya que el ferrocarril requiere maniobras que podrían considerarse imprácticas.

Los dos últimos supuestos llevaron a una clasificación de los pares Origen-Destino (O-D) por tipo de producto de modo que se pudiera agregar esta restricción al modelo de asignación.

4.3 La Matriz Origen-Destino

La clasificación de productos que se hace para cada modo, resultó más detallada en el autotransporte, por lo que se decidió homologar a la del ferrocarril quedando como sigue:

- Productos industriales
- Hierro, acero y sus derivados
- Productos químicos
- Graneles agrícolas
- Graneles líquidos
- Graneles minerales
- Productos forestales
- Equipo ferroviario

- Petrolíferos
- Contenedores
- Vehículos nuevos y autopartes
- Otros

Dada esta clasificación, se generó la matriz O-D con datos obtenidos del 2010, y se analizó el reparto por toneladas por ambos modos (Tabla 4-5).

Tabla 4-5. Reparto de toneladas por modo

Tipo de producto	Toneladas		Porcentaje de participación (%)	
	Carretera	FFCC	Carretera	FFCC
Productos industriales		14,995,315.64		13.31
Hierro, acero y sus derivados	21,598,656.00	10,904,810.04	4.22	9.68
Productos químicos	8,536,912.00	8,426,004.71	1.67	7.48
Graneles agrícolas	4,256,192.00	28,607,914.39	0.83	25.40
Graneles líquidos	6,617,888.00	1,740,342.50	1.29	1.54
Graneles minerales	10,295,920.00	28,298,799.31	2.01	25.12
Productos forestales	6,840,392.00	1,291,597.55	1.34	1.15
Equipo ferroviario	106,288.00	219,069.38	0.02	0.19
Petrolíferos	5,173,072.00	6,559,012.81	1.01	5.82
Contenedores	114,401,161.60	6,763,247.30	22.33	6.00
Vehículos nuevos y autopartes	12,780,840.00	4,079,966.40	2.50	3.62
Carga general no contenerizada	9,039,152.00	NA	1.76	NA
Materiales peligrosos	731,168.00	NA	0.14	NA
Otros	NA	761,196.45	NA	0.68
Productos que viajan sólo por carretera	94,112,300.81	NA	18.37	NA
Productos con traslado menor a 400km	217,737,158.38	NA	42.51	NA
Total	512,227,100.79	112,647,276.48		

Como se ve en la Tabla 4-5, lo que más se mueve por carretera son los contenedores y por ferrocarril los graneles minerales y agrícolas. Cabe destacar que el 39% de la carga total que se mueve por carretera podría moverse por ferrocarril, y en caso de que sucediera esto, las toneladas movidas por ambos modos se igualarían, ya que con los datos antes mencionados, se observa que el ferrocarril mueve sólo el 18% del tonelaje total, mientras que el autotransporte mueve el 82% restante.

Otro punto importante para la modelación, es considerar el costo de operación para cada modo. Los costos promedio estimados por tipo de terreno (plano, lomerío y montaña). Para un camión articulado T3S3 (tractor de 3 ejes y semirremolque de tres ejes) y para un carro de tren, son los que se muestran en la Tabla 4-6 (Arroyo et al., 2010 y Centeno y Mendoza, 2003).

Tabla 4-6. Tabla de costos de operación de ambos modos por tipo de terreno

Vehículo	Plano	Lomerío	Montaña	Unidades
T3S3	16.59	20.82	25.62	\$/veh-km
FFCC	7.99	13.52	19.97	\$/carro-km

4.4 Modelación

Para la etapa de modelación se establecieron las restricciones mencionadas en la sección 4.2, por lo que se definió en la tabla de atributos de la red, la capacidad, la distancia, velocidad permitida y costo para cada arco y modo. La red no contiene ninguno de estos valores iguales a cero o negativos para asegurar que el software TransCAD siempre pueda encontrar la ruta más corta (en tiempo y costo de operación) entre los pares OD. Para las restricciones del tipo de producto, se hizo la distinción en los atributos de cada arco para cada modo, para poder indicarle al software en tal caso que se restrinja el movimiento de carga por los arcos del ferrocarril.

Después, para la tercera etapa de la modelación, se probó la conectividad de la red.

Para la cuarta etapa, es necesario definir los escenarios posibles y el tipo de modelo de asignación a utilizar, que en este caso, son:

- Asignación de toneladas en la red bimodal con base en el tiempo de viaje por arco.
- Asignación de toneladas en la red bimodal con base en el costo de operación por arco.

Los flujos de carga se asignan en función de las características (tiempo y costo) de cada arco en la red bimodal, dando así como resultado la mejor ruta entre cada par OD.

Primero, se realizó la asignación de flujos tomando en cuenta el tiempo de viaje entre origen y destino; los resultados obtenidos se muestran en la Figura 27. En esta asignación se observa mayor carga en los tramos carreteros y poca a la del ferrocarril. Esto se debe a que el tiempo de recorrido en el modo carretero es menor que en el modo ferroviario, aunque la congestión no permite que todo el flujo se traslade por carretera, es por eso que asigna alguna carga al ferrocarril. Este resultado obtenido valida el modelo construido, ya que reproduce el comportamiento esperado, cuando se ignoran los costos operativos en cada modo.

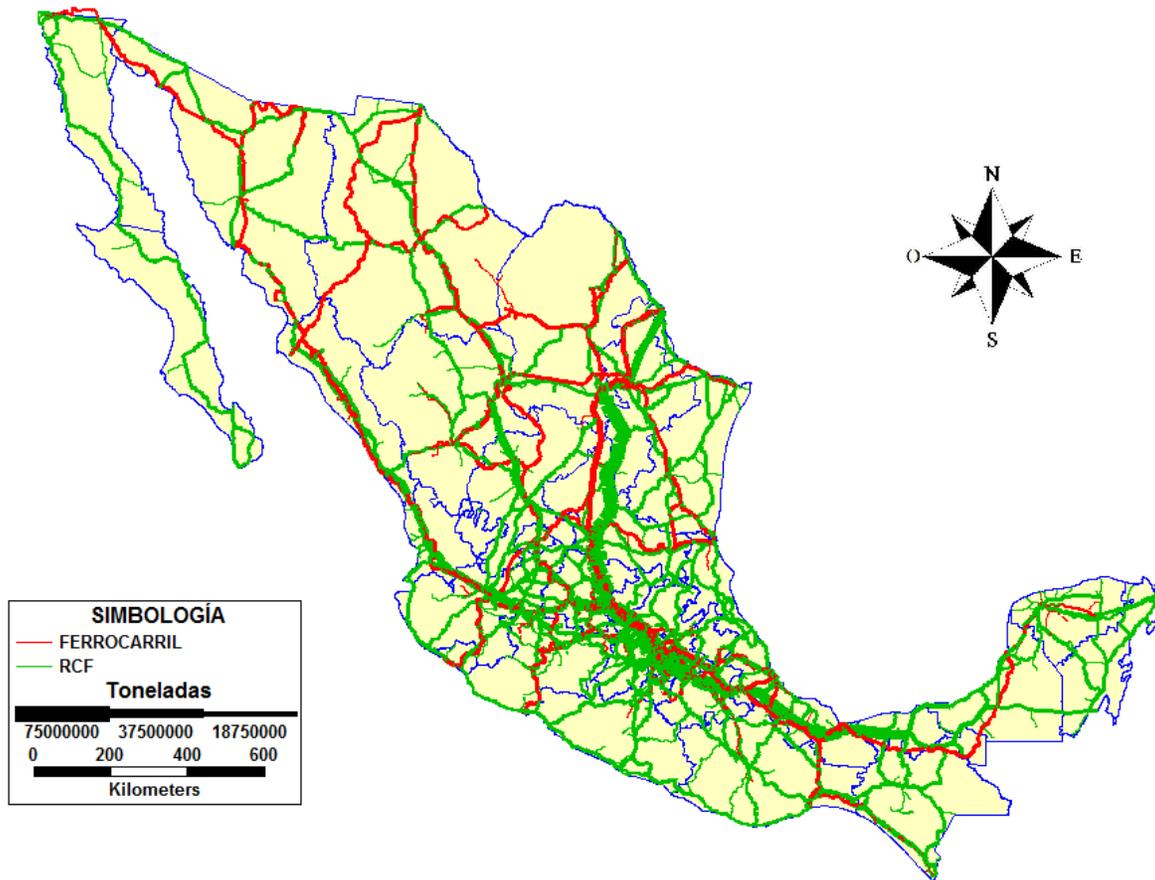


Figura 27. Asignación de toneladas de ferrocarril y autotransporte con base en el tiempo de viaje por arco. (Fuente: elaboración propia).

Verificada la validez del modelo con lo obtenido en la Figura 27, se hizo la asignación con el costo de operación para ambos modos, los resultados se muestran en la Figura 28, donde se pueden ver que el flujo en el modo ferroviario aumenta considerablemente y ahora parecen invertirse las toneladas transportadas en comparación con la Figura 27. Dado que los costos de operación del ferrocarril son más bajos que los del autotransporte, el modelo identifica una mayor eficiencia al mover la carga por ferrocarril.

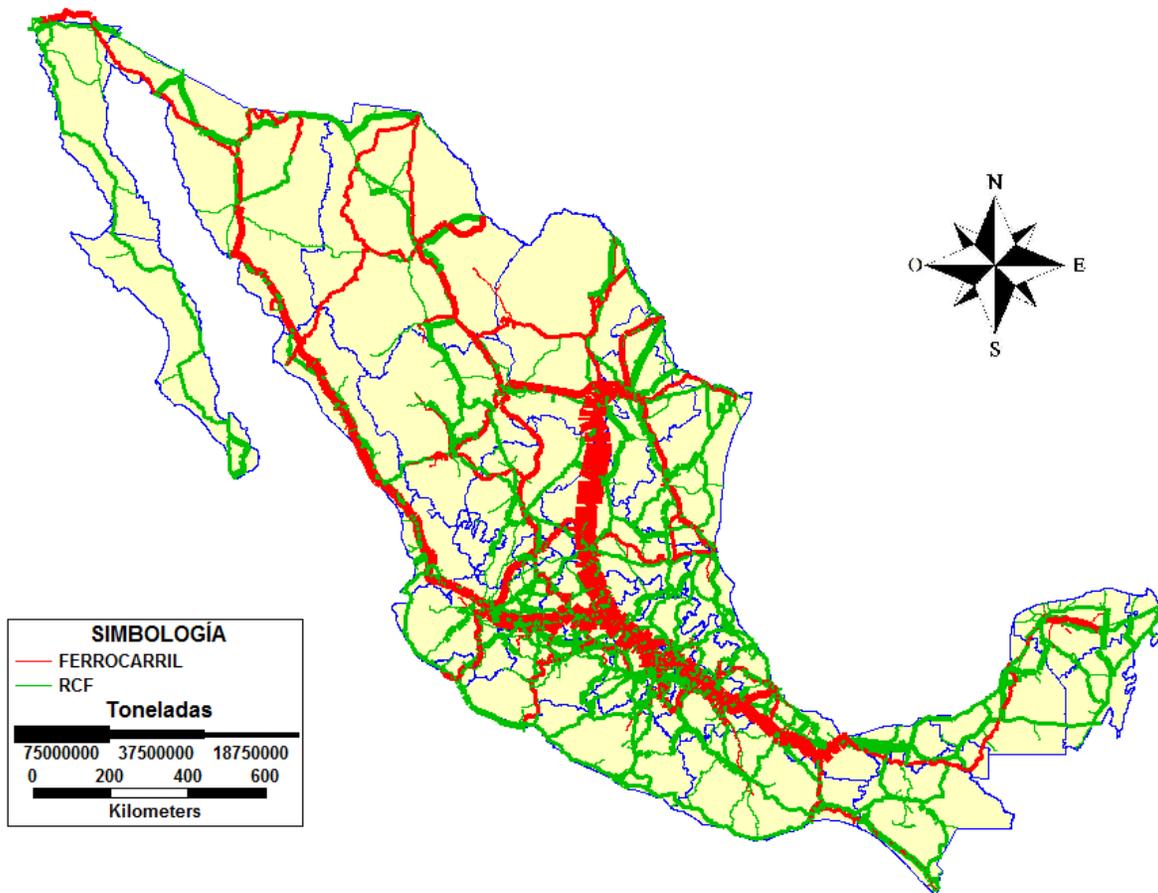


Figura 28. Asignación de toneladas de ferrocarril y autotransporte con base en el costo de operación. (Fuente: elaboración propia).

Estas asignaciones en la red bimodal, muestran que el ferrocarril es un modo más económico para el usuario, permitiendo una mayor fluidez en la red carretera, no siendo así si al usuario le interesa el minimizar el tiempo de traslado de la carga, ya que por las características propias de la carretera y la definición del modelo, esta forma de transporte, es la mejor opción comparada con el ferrocarril.

4.5 Emisión de contaminantes

Uno de los impactos indeseados del transporte de carga es la emisión de contaminantes. Para ejemplificar la estimación de diferencias en emisiones para el

modo carretero y el ferroviario se modeló la generación de contaminantes en el movimiento de carga en un corredor: México-Nuevo Laredo, utilizando las rutinas de asignación de TransCAD usadas para el reparto modal.

En el movimiento intermodal, la ruta desde el punto origen al destino combina los dos modos de transporte: autotransporte o tren, y para suponer que el reparto puede hacerse de forma bimodal, se debe considerar que el ferrocarril sea capaz de atraer carga del autotransporte. A continuación se muestra una tabla con las fuentes de emisión de contaminantes se deben tomar en cuenta:

Tabla 4-7. Fuente de emisión de contaminantes para diferentes escenarios (CDM,2011)

Fuente		Gas	¿Incluído?	Justificación
Escenario Base	Consumo de combustible para la transportación de carga	CO ₂	Sí	Principal fuente de emisión de contaminantes
		CH ₄	No	Excluído por simplificación. Es conservativo.
		N ₂ O	No	Excluído por simplificación. Es conservativo.
Proyecto	Consumo de combustible/ electricidad para la transportación de carga	CO ₂	Sí	Principal fuente de emisión de contaminantes.
		CH ₄	No	Excluído por simplificación. Es conservativo.
		N ₂ O	No	Excluído por simplificación. Es conservativo.

Para calcular la reducción de emisión de contaminantes, se considera:

$$ER_y = BE_y - PE_y , \quad (19)$$

donde ER_y son las reducciones de emisiones en el año y ,

BE_y emisiones base en el año y ,

PE_y emisiones del proyecto en el año y ,

Para estimar el factor de emisiones del año base (EF_{BL}) se utilizan datos históricos para calcular: la cantidad de combustible consumido para el transporte de carga; el valor calorífico neto; el factor de emisiones de CO₂ de los tipos de combustible usados; la cantidad de carga transportada; la distancia base de la ruta del viaje y un factor para contar los viajes de regreso que no vayan vacíos. La fórmula resultante se muestra en la Ecuación 19.

$$EF_{BL} = \frac{\sum_i FC_{BL,i,x} \cdot NCV_{i,x} \cdot EF_{CO_2,i,x} \cdot F_{RT,BL}}{T_x \cdot AD}, \quad (20)$$

EF_{BL} factor de emisión de base para transporte de carga,

$FC_{BL,i,x}$ cantidad de combustible i consumido por autotransporte en el año x ,

$EF_{CO_2,i,x}$ factor de emisiones de CO₂ de combustible i consumido por autotransporte en el año x ,

$NCV_{i,x}$ promedio neto calorífico neto de combustible i consumido por autotransporte en el año x ,

$F_{RT,BL}$ factor de viajes de regreso no vacíos,

T_x cantidad de carga transportada en el año,

AD distancia basal de la ruta,

x año de implementación.

Para determinar $F_{RT,BL}$, se toman en cuenta los viajes que regresaron vacíos. En caso de que se pueda probar que todos los viajes de regreso iban vacíos, el $F_{RT,BL} = 1$. En caso contrario, el factor se determina como sigue (CDM, 2011):

$$F_{RT,BL} = \frac{T_x \cdot AD}{T_x \cdot AD + T_{RT,x} \cdot RTD_x}, \quad (21)$$

$F_{RT,BL}$ factor de viajes de regreso no vacíos (fracción),

T_x cantidad de carga transportada en autotransporte en el año x ,

AD distancia basal de la ruta,

$T_{RT,x}$ cantidad de carga transportada en autotransporte en viajes de regreso en el año x ,

RTD_x distancia de la ruta de los viajes de regreso en el año x ,

x año de implementación del proyecto.

Considerando el caso de estudio de la emisión de contaminantes en el corredor México-Nuevo Laredo se generan dos escenarios:

- Emisión de contaminantes considerando el flujo en carretera resultante de la asignación cuando no hay oportunidad de intercambio modal.
- Emisión de contaminantes considerando el flujo en carretera resultante de la asignación cuando hay oportunidad de intercambio modal con el ferrocarril.

En el escenario base se calcula la estimación de contaminantes considerando la asignación de flujo sin considerar la oportunidad de cambio de modo, es decir, no se transfiere carga movida por carretera. De este escenario se obtuvo que al no haber intercambio modal, el corredor México-Nuevo Laredo se congestiona y entonces como se esperaba, la emisión de contaminantes en todo el corredor prácticamente se mantiene en los mismos niveles, con excepción de la parte norte, donde es un poco menor, esto se puede ver en la Figura 29.

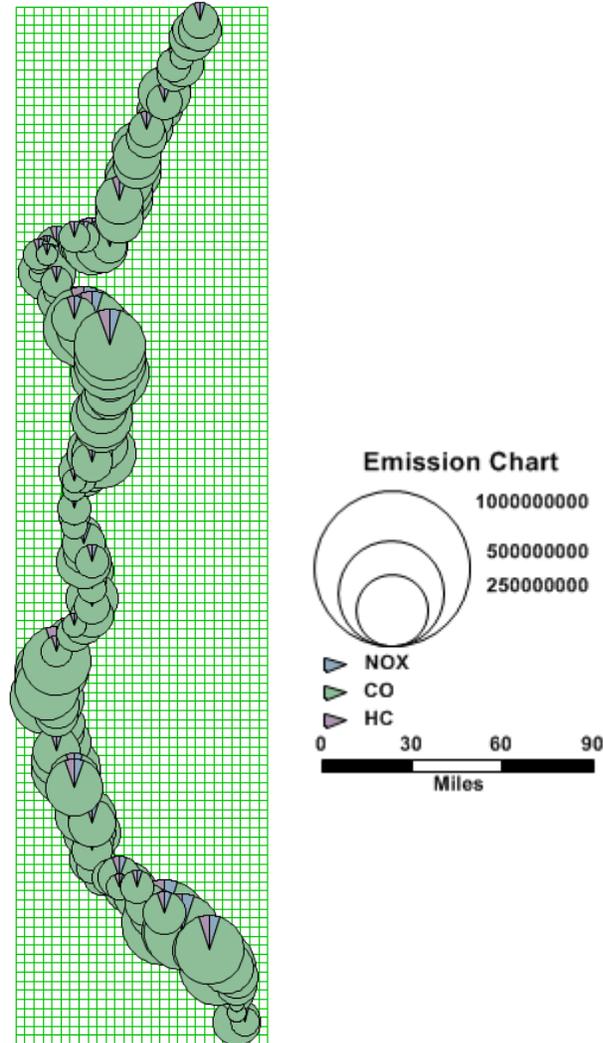


Figura 29. Emisión de contaminantes en el corredor México-Nuevo Laredo sin intercambio de mercancía en la red bimodal. (Fuente: elaboración propia).

Como segundo escenario, se consideró la estimación de contaminantes de acuerdo a los flujos obtenidos para carretera en el corredor México-Nuevo Laredo permitiendo el intercambio de mercancía con el ferrocarril. Los resultados obtenidos se ven en la Figura 30, en la que a diferencia de la Figura 29, se puede observar que hay tramos del corredor donde la emisión es menor o inclusive hay dos tramos donde la emisión es insignificante; en el centro del corredor se obtuvo una emisión muy baja en comparación a la Figura 29, por lo que entonces, se

concluye que si hay intercambio de mercancía en la red carretera y ferroviaria, la emisión de contaminantes es mucho menor a que si no lo hay.

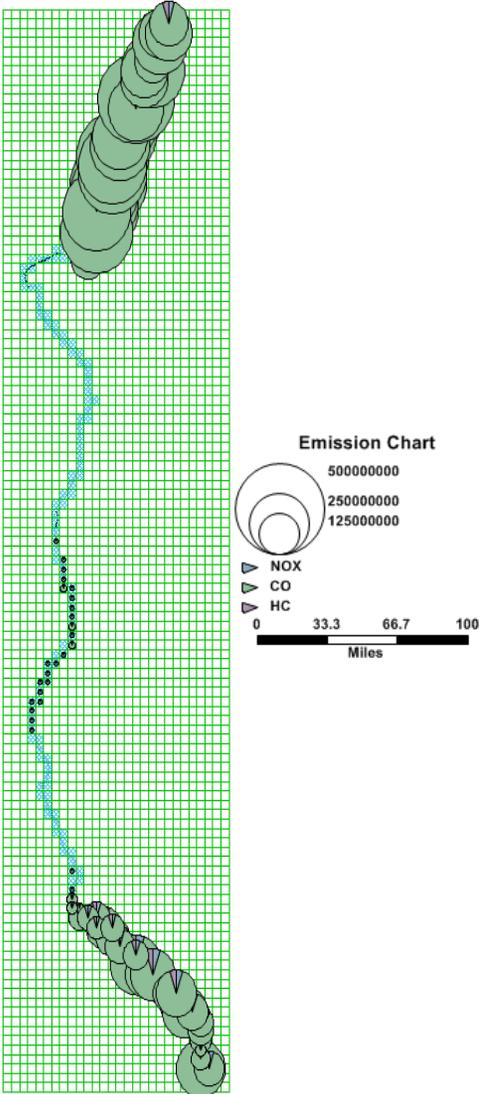


Figura 30. Emisión de contaminantes en el corredor México-Nuevo Laredo con intercambio de mercancía en la red bimodal. (Fuente: elaboración propia).

4.6 Conclusiones

El estudio de la red bimodal terrestre, permite el análisis de los flujos actuales en los modos carretero y ferroviario, en la que domina el autotransporte y en la que el ferrocarril, a pesar de incrementar anualmente su participación en el movimiento de carga, no compite con el autotransporte.

Por medio de la metodología de esta tesis, se analizó el problema de la ruta más corta y su generalización con las funciones de volumen demora, para modelar la congestión en la red carretera, y el uso de una red bimodal para representar las posibilidades de transferencia de carga entre autotransporte y ferrocarril. Usando como base los criterios de optimización derivados de los principios de Wardrop y el software TransCAD para realizar las asignaciones de flujo de costo mínimo, se probaron cuatro escenarios para ilustrar las posibilidades del reparto modal carretera-ferrocarril y también las diferencias resultantes en el impacto ambiental de estos dos modos de transporte.

El modelo al calcular la asignación de flujos en la red bimodal, tomando en cuenta el tiempo de viaje y el costo de operación, como resultado, dado que el autotransporte registra menor tiempo de travesía, en este escenario, la carga se mueve principalmente por este modo, y lo poco que se mueve por ferrocarril es debido al factor de congestionamiento que se da en carretera; al asignar el flujo con el costo de operación, el sistema es más equilibrado en ambos modos.

Al considerar la emisión de contaminantes, se observó que al restringir a la carga por el modo carretero, los contaminantes son mayores que al permitir el intercambio modal, es decir, ambientalmente el impacto es menor si se tuviera una asignación bimodal más equilibrada.

Algunas sugerencias de mejora, son:

1. Incentivar el uso del ferrocarril para lograr que este modo atraiga cargas que se mueven actualmente por autotransporte.

2. Aumentar las facilidades de intercambio modal, a fin de que al usuario no le ocasione un mayor retraso en tiempo o un costo adicional.
3. Mejorar el control de la práctica de sobrecarga, a fin de que las cargas en exceso del autotransporte tengan oportunidad de moverse en ferrocarril.

Un trabajo futuro es el análisis de sensibilidad de la red bimodal para estimar los efectos estimados y emisión de contaminantes derivados de cambios en escenarios, como pudieran ser el aumento de precio de diésel, los precios de carreteras de cuotas, entre otros. Esto es útil para poder impulsar el intercambio modal en el transporte de carga terrestre en México.

Se espera que lo obtenido en esta tesis sea de utilidad para la planeación del sector de transporte de carga terrestre, así como del diseño de políticas que impulsen el intercambio modal.

5. REFERENCIAS

- Akcelik, R. 1991. Travel time functions for transport planning purposes: Davidson's function, its time-dependent form and an alternative travel time function, Australian Road Research 21 (3): 49-59.
- Akcelik, R. 2003. Speed-flow models for uninterrupted traffic facilities. Technical Report. Akcelik & Associates Pty Ltd. Australia
- Anuario Estadístico Ferroviario 2012. 2012. Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal.
- Arroyo Osorno, J.A., R. Aguerrebere Salido, G. Torres Vargas. 2010. Costos de Operación Base de los Vehículos Representativos del Transporte Interurbano 2010. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 337. Querétaro, México.
- Branston, D. 1976. Link capacity functions: a review. Transportation Research 10: 223-236 (Abstr.).
- Behrends, S. 2012. The significance of the urban context for the sustainability performance of intermodal road-rail transport. Procedia – Social and Behavioral Sciences, Vol. 54: 375-386
- Bourges Díaz Marta, C. 2011. Indicadores de eficiencia energética en el sector transporte. [http://www.energia.gob.mx/taller/res/1859/2_Carla_Bourges_\(AIE-SENER\)_Transporte.pdf](http://www.energia.gob.mx/taller/res/1859/2_Carla_Bourges_(AIE-SENER)_Transporte.pdf) (consultado el 15 de agosto 2014)
- Bustos Rosales, A., L.F. Miranda Moreno, J. Acha Daza, R. Aguerrebere Salido, M.E. De la Torre Romero, J.A. Balbuena Cruz. 2003. Análisis del potencial para el intermodalismo en el movimiento de mercancías, proyecciones 2000, 2010, 2025. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 235. Querétaro, México.
- Caliper. 2012. Travel demand modeling with TransCAD 6.0. TransCAD user's guide. Transportation Planning Software. Caliper Corporation, USA.
- CDM. 2011. AM00090, Modal shift in transportation of cargo from road transportation to water or rail transportation.
- Centeno Saad, A.G., A. Mendoza Díaz. 2003. Modelo de Asignación Intermodal Multiproducto para las Operaciones de Carga por Autotransporte y Ferrocarril. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 222. Querétaro, México.
- Department of Computer Science. 2014. Shortest path. Princeton. <http://www.cs.princeton.edu/~rs/AlgsDS07/15ShortestPaths.pdf>

- Dowling, R., A. Skabardonis. 2006. Urban arterial speed-flow equations for travel demand models. Innovations in travel modeling, 2006. A Transportation Research Board Conference.
- Gutiérrez Hernández, J.L, V. Soria Anguiano. 2013. Estudio estadístico de campo del autotransporte nacional. Análisis estadístico de la información recopilada en las estaciones instaladas en 2012. Instituto Mexicano del Transporte. Documento Técnico No. 54. Querétaro, México.
- Haulk, C. 1998. Inland waterways as vital national infrastructure: refuting "Corporate Welfare" attacks. Allegheny Institute for Public Policy.
- Hernández Ayuso, M.C. 2005. Introducción a la teoría de redes. (2ª edición). Sociedad Matemática Mexicana, México. ISBN: 968-36-5770-2.
- Highway Capacity Manual. 2000. Transportation research board. The National Academy of Sciences, USA.
- Hillier, F.S., G.J. Lieberman. 2010. Introducción a la investigación de operaciones. (9ª edición). Mc Graw-Hill, México. ISBN: 978-607-15-0308-4.
- Horowitz, A. J. 1991. Delay/volume relation for travel forecasting based upon the 1985. Highway Capacity Manual, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.
- Janic, M., T. Jovanovic. 2012. Estimating some social and environmental effects form rail / road substitution in the Trans-European transport corridors. Traffic and Environment traffic Review. Vol 24 (Sup. 4):335-341.
- Jastrzebski, W. P. 2000. Volume delay functions, 15th International EMME/2 User's Group Conference.
- KAR, Kentucky Association of Riverport. 2014. http://kentuckyriverports.com/water_transport_benefits/ (consultado el 1 de septiembre de 2014)
- Manual Estadístico del Sector Transporte 2009. 2009. Instituto Mexicano del Transporte.
- Manual Estadístico del Sector Transporte 2012. 2012. Instituto Mexicano del Transporte.
- Manual Estadístico del Sector Transporte 2013. 2013. Instituto Mexicano del Transporte.
- Martner, C., A. Pérez. 2006. Evolución y tendencias recientes de la contenerización en México. Instituto Mexicano del Transporte. Notas Núm. 101, Artículo 1. Querétaro, México.

- Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú. 2010. Metodología de actualización del modelo de transportes del área metropolitana de Lima y Callao: 85-90.
- Moreno Quintero, E. 1997. La privatización del servicio ferroviario en Ferrocarriles Nacionales de México: una breve crónica. Instituto Mexicano del Transporte. NOTAS, Núm 34, Artículo 2. Publicación bimestral de divulgación externa. Querétaro, México.
- Moreno-Quintero, E. 2005. Optimal control of road freight flows by route choice inducement: a case from Mexico. European Journal of Operational Research. Vol. 175 (Sup. 3):1588-1604.
- Moreno Quintero, E. 2008. Reducción de la congestión vehicular y los principios de Wardrop. Instituto Mexicano del Transporte. NOTAS, Núm. 110. Publicación mensual de divulgación externa. Querétaro, México.
- NCHRP. 1998. Travel estimation techniques for urban planning. Report 365. TRB. Washington, D.C.
- Ortúzar, J. de D., L. Willumsen. 2011. Modeling transport. (4ª ed). John Wiley.
- Peniche, R.R., A. Becerra, Y. A. De Santiago. 2006. Apuntes del curso de análisis de redes. Universidad Autónoma de Querétaro. México.
- Rico Rodriguez, A., A. Mendoza-Díaz, E. Jiménez-Sánchez, E. Mayoral-Grajeda. 1995. Un análisis de reparto modal de carga entre carretera y ferrocarril. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 76. Querétaro, México.
- Rico, O. 1998. Evolución de la Industria del Autotransporte de Carga en México en el Periodo 1988-1993. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 100. Querétaro, México.
- Superior Rail Support Incorporated. 2014. <http://www.superiorrail.com/pages/efficiency.html> (consultado el 2 de septiembre del 2014)
- Spiess, H. 1997. Conical volume delay-functions, EMME/2 Support Center, <http://emme2.spiess.ch/conic/conic.html> (consultado el 30 agosto 2013)
- Waze. 2014. <https://www.waze.com/es-419> (consultado el 30 de mayo del 2014)