



# INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

## INGENIERÍA INDUSTRIAL

Informe Final del Proyecto de Residencia Profesional

### ***“Aplicaciones de Inteligencia Artificial para el Transporte Intermodal”***

Presentado por

**Ana Luisa Miranda Contreras**

**No. de Control: 06270397**

Asesor Interno

**Dr. Elías Nefthalí Escobar Gómez**

Asesor Externo

**Dr. Jaime Mora Vargas**

Revisores

**Dr. Sabino Velázquez Trujillo**

**M.C. Jorge Antonio Mijangos López**

**Agosto-Diciembre 2010**



**TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY**

Atizapán de Zaragoza, Edo. De México. A 10 de Diciembre de 2010

**Asunto: Terminación de Residencia Profesional**

**M.C. Roberto Carlos García Gómez**  
**Jefe del Depto. De Gestión Tecnológica y Vinculación**  
**Presente**

Por medio de la presente me permito informarle que la alumna **Miranda Contreras Ana Luisa** de la carrera de **Ingeniería Industrial**, con número de control **06270397** del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, ha concluido satisfactoriamente su **Residencia Profesional** al realizar en esta Institución el proyecto denominado **Aplicaciones de Inteligencia Artificial para el Transporte Intermodal**.

Sin más por el momento me despido y quedo de usted.

**ATENTAMENTE**

**Dr. Jaime Mora Vargas (jmora@itesm.mx)**  
**Director de la Maestría en Ingeniería Industrial**  
**Tecnológico de Monterrey**  
**Campus Edo. De México**

c.c.p. Archivo  
c.c.p. Alumna



**Campus Estado de México**  
Carretera Lago de Guadalupe Km. 3.5  
Col. Margarita Maza de Juárez  
Atizapán de Zaragoza  
52926 Edo. de México, México  
Tel: (52/55) 5864 5555

# Índice

Introducción.....	2
Capítulo 1 Caracterización del Proyecto .....	4
1.1. Antecedentes.....	5
1.2. Definición del Problema.....	7
1.3. Objetivos.....	7
1.3.1. Objetivo General .....	7
1.3.2. Objetivos Específicos.....	8
1.4. Justificación .....	8
1.5. Delimitación del Problema .....	9
Capítulo 2 Fundamento Teórico .....	11
2.1. El Transporte .....	12
2.1.1. Transporte Intermodal.....	14
2.1.2. Logística.....	20
2.2. Complejidad Computacional.....	21
2.2.1. Complejidad de los Cálculos .....	22
2.2.2. Complejidad de los algoritmos .....	22
2.2.3. Complejidad de los problemas .....	23
2.3. Cálculos de tiempo polinómico .....	23
2.3.1. La Clase P .....	23
2.3.2. Problemas de decisión.....	25
2.3.3. Complejidad Temporal de Máquinas No Deterministas .....	25
2.3.4. La clase NP.....	26
2.4. Técnicas de solución del problema .....	27
2.4.1. Técnicas tradicionales.....	27
2.4.2. Técnicas de inteligencia artificial.....	29

Capítulo 3 Desarrollo del Modelo .....	35
3.1. Elaboración de la Red .....	39
3.1.1. Definición y características de Transporte Intermodal .....	39
3.1.2. Diferentes operadores.....	39
3.1.3. Datos Estadísticos sobre el transporte intermodal en México.....	40
3.1.4. Búsqueda de Información sobre los Puertos marítimos .....	40
3.1.5. Búsqueda de Información sobre los puntos Fronterizos .....	40
3.1.6. Búsqueda de los principales corredores intermodales .....	41
3.1.7. Búsqueda de Información sobre las principales terminales intermodales.....	41
3.1.8. Elaboración de la red de transporte a utilizar .....	41
3.1.9. Ajuste de la red .....	42
3.2. Modelado del problema .....	42
3.2.1. Aplicación del Programa Gams.....	42
3.2.2. Aplicación del Programa Aimms .....	42
3.2.3. Análisis del Algoritmo de Recocido .....	43
3.2.4. Aplicación de Matlab.....	43
3.2.5. Ajuste de la función de Evaluación .....	43
3.2.6. Ajuste de la función perturbación .....	43
3.2.7. Modelado de una instancia de menor tamaño .....	44
3.2.8. Diferentes tipos de perturbación .....	44
Capítulo 4 Aplicación del Método .....	45
4.1. Elaboración de la Red .....	46
4.1.1. Definición y características de Transporte Intermodal .....	46
4.1.2. Diferentes operadores.....	46
4.1.3. Datos Estadísticos sobre el transporte intermodal en México.....	47
4.1.4. Búsqueda de Información sobre los Puertos Marítimos .....	58
4.1.5. Búsqueda de Información sobre los puntos Fronterizos .....	65

4.1.6.	Búsqueda de los principales corredores intermodales .....	67
4.1.7.	Búsqueda de Información sobre las principales terminales intermodales.....	69
4.1.8.	Elaboración de la red de transporte a utilizar .....	73
4.1.9.	Ajuste de la red .....	74
4.2.	Modelado del problema .....	75
4.2.1.	Aplicación del Programa Gams.....	78
4.2.2.	Aplicación del Programa Aimms .....	82
4.2.3.	Análisis del Algoritmo de Recocido .....	85
4.2.4.	Aplicación de Matlab.....	86
4.2.5.	Ajuste de la función de Evaluación .....	92
4.2.6.	Ajuste de la función perturbación .....	93
4.2.7.	Modelado de una instancia de menor tamaño .....	94
4.2.8.	Diferentes tipos de perturbación .....	94
Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones .....		98
5.1.	Conclusiones.....	99
5.2.	Recomendaciones.....	100
Bibliografía .....		<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Anexos .....		103
Glosario.....		113

## Lista de tablas

Tabla 2.1	Costo Estructural para cada modo .....	14
Tabla 4.1	Movimiento de contenedores por autotransporte y ferrocarril en la frontera Norte de México 2006 .....	66
Tabla 4.2	Descripción del proceso de Recocido Simulado .....	85

## Lista de Figuras

Figura 3.1	Procedimiento para determinar la red de transporte intermodal en México.....	37
Figura 3.2	Procedimiento para desarrollar el modelo de la red.....	38
Figura 4.1	Evolución de la transferencia de carga marítima-terrestre en tráfico de importación.....	50
Figura 4.2	Evolución de las importaciones y exportaciones en la carga marítima contenerizada.....	51
Figura 4.3	Importaciones en miles de toneladas.....	52
Figura 4.4	Exportaciones en miles de toneladas.....	53
Figura 4.5	Sistema ferroviario de México.....	54
Figura 4.6	Mapa del Sistema Ferroviario de la Concesionaria Ferromex.....	55
Figura 4.7	Mapa del Sistema Ferroviario de la Concesionaria Kansas City Southern Mexico.....	55
Figura 4.8	Red federal de carreteras de México.....	56
Figura 4.9	Ramal de carreteras de Manzanillo y Lázaro Cárdenas a Tampico.....	57
Figura 4.10	Ramal D.F. – Piedras Negras y Nuevo Laredo.....	57
Figura 4.11	Ramal Querétaro- Cd. Juárez.....	58
Figura 4.12	Gráfica del Movimiento de contenedores en los Puertos de México. Ene-Dic 2009 TEU's.....	59
Figura 4.13	Movimiento de Contenedores. Real Noviembre 2010-2009 POA 2010.....	60
Figura 4.14	Participación por tipo de carga operada. Toneladas Operadas a Noviembre 2010.....	61
Figura 4.15	Corredor Nafta.....	61
Figura 4.16	Rutas de Importación al puerto de Manzanillo.....	63
Figura 4.17	Origen de las Importaciones en el Puerto de Manzanillo.....	63
Figura 4.18	Movimiento de contenedores en Manzanillo. 1994-2009.....	64

Figura 4.19	Movimiento de contenedores en el puerto de Manzanillo en el año 2009 y 2010.....	64
Figura 4.20	Participación de las aduanas en las importaciones.....	66
Figura 4.21	Participación de las aduanas en las exportaciones.....	67
Figura 4.22	Corredores intermodales de 2006.....	i
Figura 4.23	Corredores intermodales para el 2012.....	i
Figura 4.24	Participación de los corredores y puertos secos en el 2009.....	70
Figura 4.25	Red de transporte, primera propuesta.....	74
Figura 4.26	Red de Transporte utilizada en el problema.....	75
Figura 4.27	Descripción de Conjuntos.....	78
Figura 4.28	Parámetros correspondientes a la oferta y demanda.....	79
Figura 4.29	Parámetro de distancia correspondiente al autotransporte.....	79
Figura 4.30	Matriz de incidencia para el modo ferroviario de KCSM.....	80
Figura 4.31	Escalar correspondiente al costo por unidad por km del modo 1.....	80
Figura 4.32	Parámetro de costo del modo 1.....	80
Figura 4.33	Declaración de variables en Gams.....	80
Figura 4.34	Función objetivo.....	81
Figura 4.35	Restricción de conservación de flujo.....	81
Figura 4.36	Estructura para la solución del problema.....	82
Figura 4.37	Costos para cada modo de transporte.....	82
Figura 4.38	Recursos utilizados en cada nodo.....	83
Figura 4.39	Cantidad de contenedores a enviar por cada arco en cada modo.....	84
Figura 4.40	Gráfica correspondiente a los arcos del modo 1.....	84
Figura 4.41	Declaración de valores iniciales para el proceso de recocido.....	87
Figura 4.42	Ejemplo de solución inicial.....	87
Figura 4.43	Determinación del costo inicial.....	88
Figura 4.44	Código de recocido simulado en Matlab.....	90
Figura 4.45	Función de probabilidad de aceptación.....	91
Figura 4.46	Registro de resultados.....	91
Figura 4.47	Procedimiento para obtener el costo del modo1.....	92
Figura 4.48	Procedimiento para obtener el flujo.....	92

Figura 4.49 Evaluación de recursos disponibles .....	93
Figura 4.50 Ejemplo de una perturbación realizada a la solución para el problema de transporte de menor tamaño .....	96
Figura 4.51 Ejemplo de una perturbación modificando una línea por modo.....	96
Figura 4.52 Ejemplo de una perturbación utilizando una matriz aleatoria. ....	97

# Introducción

El comercio se incrementa cada día más y del mismo modo las necesidades de infraestructura para mover mercancías de un lugar a otro, siendo estos dentro de un mismo país o entre varios.

Con el paso de los años es preciso ampliar las capacidades de los puertos así como incrementar o mejorar las zonas de acceso hacia los puntos de concentración de mercancías, de esta manera se mantiene un correcto flujo de las mismas, tratando de satisfacer a tiempo la demanda de los crecientes mercados.

Para atender a estas necesidades se requieren proyectos con visión a futuro, que involucren la implementación de nuevas tecnologías, así como de convenios para adaptarse a los cambios de necesidades en el entorno.

La integración de la economía mexicana al mundo, y su incorporación al libre comercio con Norteamérica son factores que refuerzan la necesidad de contar con un transporte con capacidad de oferta y calidad de servicio competitivos.

La actual economía emergente de China ha intensificado el intercambio comercial entre ésta y Norteamérica, y en esta última Estados Unidos es el principal importador, por lo que el tráfico que se genera en los puertos del Pacífico ha llegado a entorpecerse por falta de capacidad. Es entonces cuando se vuelve una optativa importante utilizar los puertos de México para recibir la carga y después enviarla por carretera o ferrocarril a Estados Unidos para que ésta sea distribuida en el centro y Este de dicho país.

Por las razones expresadas en el párrafo anterior y debido a que en el interior del país existe una gran cantidad de importaciones provenientes del Oriente, es trascendental que la infraestructura de los puertos así como de las vías a utilizar

sean competitivas en capacidad, tiempo y costos; posicionando a México como la mejor opción para realizar el intercambio de mercancías con Estados Unidos. De esta forma se estaría anticipando a la creación de nuevas rutas (que transitan por otros países), y a la ampliación de capacidad en las ya existentes (como el canal de Panamá).

Para lograr este objetivo es de gran importancia optimizar el uso de la red de transporte en México, para que sea más competitiva. Para lograrlo es necesario disminuir los costos de transporte y operación al trasladar la carga. Un modo efectivo para mover mercancía a grandes distancias es la implementación del transporte intermodal, lo que permite llegar a una mayor distancia en ferrocarril a un menor costo y realizar el último movimiento o arrastre en camión.

En el capítulo uno del documento se encuentra la definición del problema, los objetivos y la justificación por lo que se llevo a cabo, además de la delimitación del mismo.

El capítulo dos contiene el marco teórico de los temas relacionados con el proyecto con la finalidad de ofrecer al lector una mayor comprensión del documento, además de los fundamentos de su desarrollo.

En el capítulo tres se describe el método utilizado para desarrollar la investigación mediante un diagrama y una breve explicación de cada punto llevado a cabo.

En el capítulo cuatro se detalla la aplicación del método con los resultados que fueron obtenidos de cada punto desarrollado.

Finalmente, en el capítulo cinco se ubican las conclusiones y recomendaciones obtenidas al realizar el proyecto.

Capítulo 1

# Caracterización del Proyecto

## 1.1. Antecedentes

Las actividades de transporte resultan de gran importancia para las empresas debido a que conforman una parte representativa de los gastos, y su optimización es de interés para aquellos que distribuyen los productos.

La producción de la rama transporte registró un alza del 3.7% en el último año, ocupando el cuarto lugar entre las actividades económicas del país.<sup>1</sup> Por lo cual se considera que el gasto que se invierte en ello constituye una parte importante en el costo total de los productos, por lo que una disminución al costo de operación incrementaría la competitividad de las empresas.

Para el período privatizado del ferrocarril (1997-2002) en México, se manifiesta un crecimiento promedio anual del 5.5% en el volumen de toneladas transportadas por ferrocarril,<sup>2</sup> por lo tanto, representa una opción para el movimiento de mercancía a grandes distancias; en 2008 los kilómetros por viaje recorridos en el modo ferroviario fueron alrededor de 748<sup>3</sup>, y la distancia promedio de los movimientos intermodales en fue de 876 kilómetros.<sup>4</sup>

La extensión de la red pavimentada fue de más de 127 mil kilómetros<sup>5</sup> y la extensión de las vías en operación fue de 23,781 kilómetros<sup>6</sup> en 2008. Por esta razón hay una menor disposición de vías para transitar, y debido a que el modo ferroviario no

---

<sup>1</sup>Fuente: Evolución del valor agregado bruto, por actividad económica. Manual Estadístico del Sector Transporte 2009, SCT e IMT.

<sup>2</sup> Fuente: Evolución mensual del tráfico de carga total remitida por ferrocarril. Manual Estadístico del Sector Transporte 2009, SCT e IMT.

<sup>3</sup> Fuente: Evolución del tráfico doméstico de carga, por modo de transporte. Manual Estadístico del Sector Transporte 2009, SCT e IMT.

<sup>4</sup> Fuente: Evolución de la contenerización, con respecto al movimiento total por ferrocarril. Manual Estadístico del Sector Transporte 2009, SCT e IMT.

<sup>5</sup> Fuente: Evolución de la red carretera, según superficie de rodamiento. Manual Estadístico del Sector Transporte 2009, SCT e IMT.

<sup>6</sup> Fuente: Evolución de la red ferroviaria. Manual Estadístico del Sector Transporte 2009, SCT e IMT.

proporciona un servicio puerta-puerta<sup>7</sup> resulta una opción combinarlo con transporte carretero para completar el recorrido, dando lugar al transporte intermodal.

El transporte intermodal es utilizado en otras regiones como Europa, como lo menciona en publicación de Pedersen y Crainic (2005), aplicando métodos heurísticos para encontrar soluciones factibles, rápidas y eficientes. De igual manera según la AMTI (Asociación Mexicana de Transporte Intermodal) países como Estados Unidos y Canadá en América del Norte al igual que España, Alemania y Francia en Europa Occidental, lo han adoptado como el esquema nodal de distribución de mercancías por sus efectos en el desalojo de los puertos, el descongestionamiento de carreteras y la disminución de la contaminación ambiental.

La distribución de mercancías en el país ya sean nacionales o extranjeras es una de las más importantes actividades que realizan las empresas y, para realizarla de una manera efectiva éstas pueden utilizar su propia flotilla o realizar estas operaciones mediante outsourcing, a través de empresas dedicadas al transporte u operadores logísticos que gestionan el envío por uno o varios modos además de ofrecer otros servicios.

En los principales puertos del Pacífico, de la carga no petrolera manejada durante el año 2006, alrededor del 75.2% del total fue desalojada de los puertos mediante autotransporte, contra el 24.8% del ferrocarril.<sup>8</sup>

Actualmente el impacto ambiental es cada vez más significativo para las empresas, atendiendo a esta necesidad el transporte intermodal brinda la oportunidad de reducir las emisiones a la atmósfera, al mover una mayor cantidad de producto mediante modos como el ferroviario, que admite una mayor capacidad que el autotransporte;

---

<sup>7</sup> Servicio en el cual se incluye el transporte desde el proveedor al puerto, puerto a puerto, y finalmente de puerto a cliente.

<sup>8</sup> Fuente: Evolución de la transferencia de carga marítima-terrestre, en tráfico de importación. Manual Estadístico del Sector Transporte 2009, SCT e IMT.

de esta manera disminuye la cantidad de viajes necesarios para mover el total de mercancía.

En consecuencia a estas razones, hay un mayor interés en la investigación de problemas de transporte de carga intermodal y suponiendo que el problema de transporte es un NP-Hard<sup>9</sup> es de esperarse que una aplicación de Inteligencia Artificial, en este caso un algoritmo de Recocido Simulado, provea buenos resultados.

## **1.2. Definición del Problema**

Ineficiencia en la distribución de productos, provenientes de Asia con destino al Este de Estados Unidos, a través de las diferentes rutas de transporte en México en distancias mayores a 500 kilómetros, debido a que en su mayoría se utiliza como único medio de repartición al autotransporte.

## **1.3. Objetivos**

Los objetivos esperados se dividen en generales y específicos según su alcance, éstos son mencionados a continuación.

### **1.3.1. Objetivo General**

Desarrollar soluciones de inteligencia artificial, en particular metaheurísticos, para optimizar el funcionamiento de una red de transporte intermodal en México.

---

<sup>9</sup> En el Marco Teórico se hace la definición de NP-Hard.

### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Identificar la red a utilizar en el problema de transporte.
- Resolver una instancia de transporte intermodal en México mediante programación lineal en GAMS<sup>10</sup>.
- Adaptar un algoritmo de recocido simulado como una estrategia de solución para obtener resultados.
- Validar el algoritmo al comparar sus resultados con los obtenidos mediante métodos de optimización.

### 1.4. Justificación

Para hacer hincapié en la importancia del transporte en México, se muestran a continuación algunos datos importantes sobre su intercambio comercial en 2007.

- El comercio exterior de México se sigue realizando en su mayor parte con América del Norte. 52% de las importaciones mexicanas y el 84.5% de las exportaciones. Esta combinación de resultados arrojó un superávit para México superior a los 82 mil millones de dólares.<sup>11</sup>
- Es importante destacar que los tigres asiáticos (Japón, Corea del Sur, China, Malasia, Taiwán y Singapur) conforman el 25.3% de las importaciones mexicanas, mientras que únicamente Japón y China agrupan el 1.4% de las exportaciones.<sup>12</sup>

Para realizar las operaciones antes mencionadas con los países Asiáticos, se hace uso de los puertos del Pacífico entre los cuales figuran como más importantes los

---

<sup>10</sup> Sistema General de Modelaje Algebraico por sus siglas en inglés *General Algebraic Modeling System*.

<sup>11</sup> Fuente: Evolución del comercio exterior de México (lab), por bloques económicos. Manual Estadístico del Sector Transporte 2009, SCT e IMT.

<sup>12</sup> Fuente: Evolución del comercio exterior de México (lab), por principales países. Manual Estadístico del Sector Transporte 2009, SCT e IMT.

puertos de Manzanillo y Lázaro Cárdenas. Por otro lado, el lugar por donde cruzan la mayoría de los productos hacia Estados Unidos es por la frontera norte, principalmente por la zona Este.

Aplicar un modelo de transporte intermodal a la red de transporte en México, permitirá que las empresas tomen en cuenta este tipo de transporte para distribuir sus productos. Se reduciría el impacto ecológico debido a que se aprovecharía la capacidad del modo ferroviario logrando distribuir un mayor volumen de producto en un solo viaje, lo cual también disminuiría los costos y haría más atractiva la propuesta.

La aplicación de un modelo de transporte que permita la programación de viajes en sus diferentes modos apoyaría la toma de decisiones para brindar un mejor servicio, a un menor costo y con una mayor rapidez.

Al generar buenos resultados se logrará la participación de diversas asociaciones como la AMTI para utilizar el modelo, e incluso al incrementar el tráfico ferroviario con el transporte de carga intermodal resultará atractivo para la inversión y propiciaría una ampliación de este sistema en el plano nacional.

Finalmente, en una instancia mayor el modelo podría ofrecerse a operadores logísticos como un soporte en la toma de decisiones, que permita flexibilidad en el manejo de los envíos de productos para disminuir el costo total del transporte.

## **1.5. Delimitación del Problema**

La investigación fue realizada sobre los puertos de Manzanillo y Lázaro Cárdenas, considerando las plataformas logísticas de Pantaco, Querétaro, Guanajuato, Gómez Palacios y Monterrey (terminales de transbordo en el interior), así como los puntos

fronterizos de Ciudad Juárez, Nuevo Laredo y Matamoros (como nodos destino) para el movimiento de mercancías; llevando a cabo una búsqueda de información en libros, revistas, documentos web, entre otros relacionados con el tema.

El proyecto se efectuó en el período comprendido entre los meses de Junio y Diciembre de 2010 en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Estado de México; ubicado en Carretera Lago de Guadalupe Km 3.5, Atizapán de Zaragoza, 52926, Estado de México.

### **1.5.1. Limitaciones**

Las principales limitaciones encontradas en la investigación son las siguientes:

- El acceso a datos reales para validar el funcionamiento del modelo.
- Limitación en recursos computacionales para modelos de gran escala.

Capítulo 2

# Fundamento Teórico

## 2.1. El Transporte

Una definición de transporte según Bowersox, Closs, y Cooper, (2007) es la siguiente; “el transporte es el área de operaciones de logística que mueve y posiciona inventario geográficamente.”

La distribución física de productos a diferentes lugares se ha vuelto tan importante para las empresas que cuentan con departamentos especializados en esta distribución a los cuales se les asigna el nombre de Tráfico o Logística. En ellos se realiza la planeación y operación de la distribución de producto, entre otras actividades afines.

Con la finalidad de brindar un buen servicio al cliente es necesario asegurar que el producto llegue al éste con las condiciones adecuadas; es decir, en tiempo, forma y al menor costo posible.

Bowersox, Closs y Cooper (2007) menciona que desde el punto de vista del sistema logístico, tres factores son fundamentales en el desempeño del transporte: (1) costo, (2) velocidad, y (3) consistencia.

De esta forma se considera que en cuanto al factor costo en el desempeño del transporte influyen no sólo el costo en el que se infiere por transportar un producto de un punto a otro; sino en todos los gastos relacionados a la operación, como puede ser tener unidades de entrega o utilizar un servicio de transporte proporcionado por una empresa experta en el ramo.

Al mencionar la velocidad como un factor de desempeño no solo se debería hacer referencia al menor tiempo, es decir, en ocasiones los productos son flexibles al manejo y no es necesario gastar grandes cantidades de dinero en transportarlos a la brevedad; sino que admiten cierta holgura para obtener costos aceptables. Por el

contrario también existen productos perecederos o algunos otros que de igual forma deben llegar a su destino en el menor tiempo posible. Por lo tanto, depende de las necesidades de cada producto y del tomador de decisiones, elegir cuál es la opción más adecuada en cada situación.

La consistencia por otro lado toma en cuenta la fiabilidad del transporte, es decir, que tan confiable es recurrir a él; por ejemplo, si el que los objetos no lleguen a tiempo implica costos elevados. Situaciones como la mencionada anteriormente son las que viven los contenedores los cuales tienen un periodo de tiempo para ser desocupados y puestos nuevamente en el puerto, esto para no incurrir en más gastos de utilización. El cliente debe confiar en que el transporte llegue en tiempo y forma a su destino; si lo anterior se cumple, el transporte tiene consistencia. Por el contrario si hay muchas variaciones en cuanto a los tiempos en los cuales se entregan los productos, entonces no existe consistencia.

Ruíz Olmedo (2007) detalla los modos y medios de transporte como a continuación se describe: Los modos están determinados por el entorno físico en el que se desplazan los bienes, por ejemplo: marítimo, aéreo, terrestre. Los medios son los vehículos utilizados en cada modo: barco, avión, camión o tren.

En la Tabla 2.1 se distingue que el costo fijo más alto se da en los ductos, siguiendo a ellos el ferrocarril, esto por las altas cantidades que deben invertirse para iniciar a operar el modo de transporte. Los más bajos son los que casi no necesitan inversión (sobre todo en infraestructura) como son el autotransporte y las aeronaves; el primero por ser las autopistas provistas por recursos públicos, y el segundo por utilizar el espacio aéreo sin necesidad de nada más para operar.

Y los costos variables consisten en aquellos en los cuales se incurre al operar el modo por cantidad de operaciones. Existe relación entre que si el costo fijo es alto, el costo variable será bajo; y que si el costo fijo es bajo, el costo variable será alto.

**Tabla 2.1** Costo Estructural para cada modo

<b>Ferrocarril.</b> Costo fijo alto en equipo, terminales, vías, etc. Costo variable bajo.
<b>Autotransporte.</b> Costo fijo bajo (autopistas son situadas y provistas por recursos públicos). Costo variable medio (combustible, mantenimiento, etc.).
<b>Aguas navegables.</b> Costo fijo medio (embarcaciones y equipo). Costo variable bajo (capacidad de transporte de gran cantidad de tonelaje).
<b>Ductos.</b> Costo fijo más alto (derechos de vía, construcción, requerimientos para control de estaciones, y capacidad de bombeo). Costo variable más bajo (sin costo de mano de obra de alguna importancia).
<b>Aire.</b> Costo fijo bajo (aeronaves y manipulación y sistema de carga). Costo variable alto (combustible, mano de obra, mantenimiento, etc.).

**Fuente:** Tomada de Bowersox, Closs y Cooper (2007)

### 2.1.1. Transporte Intermodal

Para comprender el concepto se puede tomar la siguiente definición dada por Bowersox, Closs y Cooper (2007): “el transporte intermodal combina dos o más modos para tomar ventaja de las economías inherentes de cada uno y por lo tanto provee un servicio integrado a un menor costo total.”

La OCDE<sup>13</sup> da la siguiente definición: “designa el movimiento de mercancía en una misma unidad o vehículo usando sucesivamente dos o más modos de transporte sin manipular la mercancía en los intercambios de modo. El termino intermodalidad, se ha usado para describir un sistema de transporte en el que dos o más modos de transporte intervienen en el transporte de un envío de mercancías de forma integrada, sin procesos de carga y descarga, en una cadena de transporte puerta a puerta.”

Ruiz Olmedo (2007) distingue entre multimodal e intermodal y las definiciones que adopta se citan a continuación:

<sup>13</sup> Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.

“El término **multimodal** ha sido utilizado por la Organización de las Naciones Unidas para identificar un aspecto fundamentalmente relacionado con la responsabilidad, puesto que lo vincula a un solo contrato para mover mercancías por lo menos a través de dos modos diferentes de transporte.”

“El término **intermodal** tiene un carácter más bien técnico/comercial y se refiere a la relación entre diversos medios de transporte que buscan ofrecer soluciones conjuntas. El término es usado por otros especialistas para distinguir los casos donde se intervienen exclusivamente los modos marítimo y ferroviario.”

De acuerdo con Bloch (1996) existen dos grandes categorías de problemas en la organización de los transportes. 1) elección del modo y medio adecuados. 2) programación de los movimientos. Y describe que:

La elección del medio de transporte depende de varios parámetros:

- a) cantidad de toneladas anuales a transportar, considerando las fluctuaciones estacionales.
- b) naturaleza de la mercadería.
- c) peso unitario de cada elemento a transportar.
- d) distancias a recorrer.
- e) demoras admisibles y duración del transporte en cada medio.
- f) infraestructura de transporte existente.
- g) costos de cada opción.

De este modo se infiere entonces, que en el transporte intermodal los vehículos pueden ser utilizados de manera que se aprovechen sus mejores propiedades para reducir el costo total del envío de acuerdo a las necesidades del cliente. Tal es el caso de integrar el transporte ferroviario para grandes distancias y disminuir así el costo sacrificando en baja medida el tiempo de transporte; también influye la cantidad de producto total a transportar de un punto a otro.

Para poner en práctica el transporte intermodal se hace necesaria la utilización de unidades que contengan la mercancía en el interior para que esta no sea manipulada hasta su llegada al cliente; para esto se utilizan unos recipientes de acero corrugado llamados contenedores. Además es necesario también un punto de transferencia, es decir, un lugar con equipo especializado para realizar la transmisión del contenedor de un modo a otro, como son las terminales intermodales. A continuación se explican mejor ambos conceptos.

### **2.1.1.1. El contenedor**

En Bloch (1996) se menciona la siguiente definición de contenedor:

“Un contenedor es un gran cajón de dimensiones normalizadas que sirve para simplificar significativamente las operaciones de carga, descarga y transferencia, disminuyendo con su uso los robos y otorgando una mejor protección a la mercadería”, y existen diferentes tipos:

- Cerrado (*Box*)
- De costado abierto (*Open Side*)
- De techo abierto (*Open Top*)
- Plataforma (*flat*)
- Cisterna (*Tank*)
- Isotermo
- Frigorífico (*Reefer*)
- Calorífico
- De temperatura controlada
- Plegable
- Iglú

El tipo de contenedor que se maneja normalmente en el transporte intermodal es el cerrado, y sus medidas normalizadas para los marítimos son de 20 y 40 pies, haciendo referencia al largo de la caja.

La utilización del contenedor permite hacer más práctico el cambio de modo de transporte ya que son requeridas menos operaciones para realizar el transbordo. Para realizar el intercambio se utiliza equipo especializado para el manejo de los contenedores que consta de grúas de marco, montacargas para contenedores, etc. para realizar esta función se designa una terminal especializada y puede ubicarse en un puerto marítimo o seco. Algunos equipos cambian según la ubicación por ejemplo, en un puerto marítimo se necesitan también grúas de muelle para realizar el intercambio.

#### **2.1.1.2. Terminales Intermodales, Puertos Secos**

Además del servicio de transbordo, las terminales intermodales pueden contar también con servicio de almacenaje, consolidación o desconsolidación de carga, servicios de mantenimiento de contenedores, etc. lo que la convierte en una parte esencial de la cadena de suministro para agilizar el proceso de distribución.

Un puerto seco es una terminal intermodal interior, conectada con una o varias terminales marítimas, con la capacidad de posponer el control aduanero a la entrada en el puerto seco.

Esta característica permite agilizar la salida de las mercancías de los puertos hacia su destino, contribuyendo a descongestionar sus operaciones.

Generalmente las terminales intermodales también cuentan con aduanas, de esta manera puede enviarse el producto a una terminal interior con la finalidad de agilizar el flujo en una terminal marítima.

Para poder realizar el proceso de aduana en una terminal interior es necesario que el servicio contratado sea puerto-puerta o puerta-puerta, ya que de esta manera no será necesario realizar la verificación en el puerto marítimo; o si se refiere al modo ferroviario sería rampa-puerta. Los diferentes tipos de servicio se detallan a continuación.

De acuerdo con Ruíz Olmedo (2007) los servicios intermodales por ferrocarril pueden prestarse en las siguientes modalidades:

- a) Rampa a Rampa. El embarcador entrega el contenedor cargado o vacío en la terminal intermodal ferroviaria donde se realizarán las maniobras para su posicionamiento en el equipo ferroviario. Al llegar al destino, el ferrocarril pone a disposición del consignatario el contenedor en el piso o a bordo de un chasis porta-contenedor. La tarifa incluye maniobras y flete ferroviario.
- b) Puerta a Rampa. El prestador del servicio recoge el contenedor en las puertas del consignatario para ser trasladado a la terminal intermodal ferroviaria. Al llegar a destino, el ferrocarril pone a disposición del consignatario el contenedor en el piso o a bordo de un chasis porta-contenedor. La tarifa incluye el servicio de recolección, las maniobras y el flete ferroviario.
- c) Rampa a Puerta. El embarcador entrega el contenedor cargado o vacío en la terminal intermodal ferroviaria donde se realizarán las maniobras para su posicionamiento en el equipo ferroviario. Al llegar al destino, el ferrocarril pone a disposición en la puerta del consignatario el contenedor para ser descargado. La tarifa incluye maniobras, entrega en destino y flete ferroviario.
- d) Puerta a Puerta. El prestador del servicio recoge el contenedor en las puertas del consignatario para ser trasladado a la terminal intermodal ferroviaria. Al llegar al destino, el ferrocarril pone a disposición en la puerta del consignatario el contenedor para ser descargado. La tarifa incluye recolección, maniobras, entrega en destino y flete ferroviario.

### **2.1.1.3. Puertos Marítimos**

De acuerdo con Bloch (1996) los puertos deben ser estaciones de transferencia en las que la carga cambia de modo de transporte; los puertos se constituyen, esencialmente, en prestadores de servicios y, asimismo, en polos de desarrollo.

Los puertos permiten incrementar el intercambio comercial de los países y con ello mejorar su economía. Los países que no cuentan con litoral requieren utilizar otros medios de transporte para llevar a cabo el comercio con otros países, los cuales generalmente son más costosos por unidad transportada debido a que su volumen de carga es menor; tal es el caso del transporte carretero o ferroviario.

Los servicios que ofrece un puerto cada vez son más diversos y del mismo modo se van adaptando a las necesidades del mercado ampliando su infraestructura para recibir buques de mayor tamaño o incrementando/modernizando su equipo de manejo de materiales de modo que sea suficiente y más productivo.

### **2.1.1.4. Transporte Carretero**

Las características básicas que menciona Bloch (1996) sobre el transporte carretero son las siguientes:

- a) Penetración
- b) Flexibilidad
- c) Rapidez
- d) Facilidad de coordinación con otros medios
- e) Adaptación a la rotación de stocks

### **2.1.1.5. Transporte Ferroviario**

El factor natural que favorece el desarrollo ferroviario es la distancia. Por su mayor capacidad de carga y dado que los costos de explotación no son directamente proporcionales a la distancia recorrida, es el medio ideal para largos recorridos y el transporte masivo de materias primas y otros productos de gran volumen.(BLOCH 1996)

De esta manera el transporte ferroviario es un medio de transporte más apto para grandes volúmenes en lo que respecta a su comparación con el transporte carretero. Las terminales interiores contienen vías de tren para la transferencia de productos de un modo a otro, de igual manera los principales puertos cuentan con maquinaria especializada para los transbordos.

Es importante destacar que un ferrocarril no puede llegar hasta la puerta del cliente, por lo que deberá valerse de un camión que realice esta operación, por lo que siempre serán necesarias maniobras intermedias. Debido a ello a pesar de tener ciertas ventajas en cuanto al volumen, el transporte ferroviario es un tanto más lento que otros, como el carretero; por lo que si el transporte es urgente no es conveniente utilizar éste método.

### **2.1.2. Logística**

Un concepto de logística está dado por Mora García (2008) quien cita a GSI Colombia (Instituto Colombiano de Automatización y Codificación Comercial), “logística es el proceso de planear, controlar y administrar la cadena de abastecimiento y distribución, desde el proveedor hasta el cliente y con un enfoque en la red de valor y colaboración entre los actores de la red logística interna y externa”.

Para Bloch (1996) es el proceso de planificación, operación y control de la negociación, compraventa, movimiento y almacenaje de mercaderías desde la fuente de materia prima, hasta el punto de venta del producto terminado, y aún luego, en las relaciones con el cliente, a fin de satisfacer los requerimientos del cliente al menor costo efectivo total. La logística es el estudio de los sistemas de organización y control de las actividades de movimiento y almacenaje; persigue que el flujo de materia prima y de productos se desarrolle en forma tal que la demanda sea atendida con la necesaria frecuencia a un costo mínimo.

Otra definición citada por Mora García (2008) es la promulgada por el Council of Logistics Management (CLM), Consejo de Administración Logística, es: <<La logística es el proceso de planear, implementar y controlar el flujo y almacenamiento eficiente y a un costo efectivo de las materias primas, inventarios en proceso, de producto terminado e información relacionada, desde los puntos de origen hasta los de consumo; con el propósito de satisfacer las necesidades de los clientes>>.

De esta manera una herramienta que se adapte a la red de transporte serviría como soporte para realizar la logística de los productos a distribuir y a disminuir los costos de las operaciones del sistema en conjunto.

## **2.2. Complejidad Computacional**

En Brookshear (1999) se menciona que hay algunos tipos de problemas relacionados con la optimización de estas redes de transporte.

### **2.2.1. Complejidad de los Cálculos**

Se considerará que un problema es complejo si su resolución requiere la ejecución de un algoritmo complejo. A su vez, se considera que un algoritmo es complejo si su aplicación requiere la ejecución de un cálculo complicado (se considera que un cálculo es el proceso que se lleva a cabo cuando se aplica un algoritmo en una situación determinada. Por ejemplo, el algoritmo de multiplicación tradicional conduce a diferentes cálculos, quizá con complejidades distintas, al aplicarse a diversos valores).

La dificultad o complejidad de los cálculos tiene distintas maneras de medirse dentro de las cuales se encuentran la memoria en disco (capacidad de almacenamiento) requerida para realizarse, por ejemplo cuando los datos son muchos y se van multiplicando al realizar las operaciones; o el tiempo, que se va incrementando si los cálculos son cada vez más.

### **2.2.2. Complejidad de los algoritmos**

En general, distintas aplicaciones de un mismo algoritmo producen cálculos diferentes. Por ejemplo, el cálculo que efectúe el algoritmo de búsqueda binaria dependerá del contenido de la lista y del valor que se busca o, el algoritmo de multiplicación tradicional producirá cálculos diferentes con distintos valores de entrada; de esta manera, para considerar si un algoritmo es complejo éste debe basarse en la cuestión de si los cálculos son complejos o no.

### 2.2.3. Complejidad de los problemas

Intuitivamente, esta medición debe relacionarse con la complejidad de las soluciones del problema: un problema es difícil porque no es fácil resolverlo. Sin embargo, no siempre hay que declarar que un problema es complejo simplemente porque es difícil llegar a su solución; casi siempre existe una forma difícil de resolver un problema.

Un problema debe declararse como complejo únicamente cuando no tenga una solución sencilla. “La complejidad de un problema es la complejidad de su solución más sencilla”. Por desgracia, la abundancia de soluciones para un problema hace muy difícil la identificación de una solución más sencilla. De hecho, se ha mostrado que varios problemas no tienen una solución más sencilla. (BROOKSHEAR 1999)

## 2.3. Cálculos de tiempo polinómico

Suponga que una máquina de Turing  $M$  (de una o varias cintas) calcula la función parcial  $f$ : Se dice que  $M$  calcula la función en tiempo polinómico si existe un polinomio  $p(x)$  tal que para cada  $w \in \Sigma^*$  para la cual esté definida  $f(w)$ ,  $M$  calcule  $f(w)$  en no más de  $p(|w|)$  pasos.

Una propiedad importante de las funciones que las máquinas de Turing pueden calcular en tiempo polinómico se presenta cuando la composición de dos de estas funciones también es calculable en el mismo tiempo.

### 2.3.1. La Clase P

Si  $M$  es una máquina de Turing, se dice que  $M$  acepta el lenguaje  $L$  en tiempo polinómico si  $L=L(M)$  y existe un polinomio  $p(n)$  tal que el número de pasos

necesarios para aceptar cualquier  $w \in L(M)$  no sea mayor que  $p(|w|)$ . Se dice que  $P$  es la clase de los lenguajes que las máquinas de Turing pueden aceptar en tiempo polinómico.

El interés por la clase  $P$  surge de la noción intuitiva de que contiene aquellos lenguajes que pueden ser aceptados en un tiempo razonable.

Considere, por ejemplo, una máquina de Turing  $M$  que acepta cualquier cadena  $w \in L(M)$  en una cantidad de tiempo proporcional al polinomio  $|w|^2$ , en comparación con otra máquina  $M'$  que acepta cada cadena  $w \in L(M')$  en un tiempo proporcional a la potencia  $2^{|w|}$ . Si duplicamos la longitud de la entrada de  $M$ , digamos de 10 a 20, el tiempo requerido para los cálculos correspondientes aumentaría a lo sumo en un factor de cuatro, mientras que un cambio similar en la entrada de  $M'$  daría como resultado un aumento en un factor de  $2^{10}=1024$ .

Así, conforme aumenta la longitud de las cadenas evaluadas, esperamos que  $M$  consuma mucho menos tiempo que  $M'$ . De hecho, si la ejecución de cada paso requiriera un microsegundo, entonces  $M$  podría procesar una cadena de longitud 50 en menos de un segundo, mientras que  $M'$  necesitaría más de 35 años para procesar la misma cadena.

Otra característica importante de  $P$  es que permanece estable en un amplio rango de sistemas computacionales. Si cambiamos el sistema computacional, la clase de los lenguajes que pueden aceptarse en tiempo polinómico tiende a permanecer sin cambios. Esto no debe causar sorpresa alguna; después de todo la clase  $P$  consiste en todos los lenguajes que pueden aceptarse en un tiempo  $O(n^d)$  para algún  $d \in \mathbf{N}^+$ , por lo que una clasificación basada en complejidad temporal que sea polinómica o no, es más general que una que hace distinciones entre las tasas de crecimiento. (BROOKSHEAR 1999)

### **2.3.2. Problemas de decisión**

Un problema de decisión es aquel problema que puede expresarse en forma de una pregunta cuya respuesta es sí o no. Al codificarse como la entrada de una máquina de Turing, cada caso de este tipo de problemas se representa como una colección de cadenas de símbolos. De esta manera una cadena puede representar una solución, tomando cada eslabón como cada una de las partes de la combinación de salida.

De acuerdo con Brookshear (1999) establece las siguientes caracterizaciones equivalentes de la clase P:

1. La clase de los lenguajes que pueden aceptar las máquinas de Turing en tiempo polinómico.
2. La clase de los lenguajes que pueden decidir las máquinas de Turing en tiempo polinómico.
3. La clase de los problemas de decisión que pueden resolver las máquinas de Turing en tiempo polinómico.

### **2.3.3. Complejidad Temporal de Máquinas No Deterministas**

Las máquinas de Turing tradicionales (de una sola cinta), las de varias cintas y las no deterministas poseen el mismo poder de reconocimiento de lenguajes en lo que se refiere a que un lenguaje aceptado por una máquina de una de las clases puede ser aceptado por una máquina de cualquier otra clase. Esta igualdad de poder se conserva entre las máquinas de Turing de una y varias cintas cuando se restringen a cálculos en tiempo polinómico.

#### 2.3.4. La clase NP

Se dice que una máquina de Turing no determinista  $M$  acepta el lenguaje  $L$  en tiempo polinómico si  $L=L(M)$  y existe un polinomio  $p(x)$  tal que para cualquier  $w \in L$ ,  $M$  acepta  $w$  con una serie de cálculos que no excede de  $p(|w|)$  pasos. Así mismo, se define  $NP$  como la clase de los lenguajes que pueden aceptar las máquinas de Turing no deterministas en tiempo polinómico.

Puesto que toda máquina de Turing determinista está contenida en la clase de las máquinas de Turing no deterministas, podemos afirmar de inmediato que  $P \subseteq NP$ . Sin embargo, la cuestión de si  $P = NP$  aún no se ha resuelto de hecho, quizás se trate del problema de investigación más importante en las ciencias de la computación actualmente.

Existen numerosos problemas de decisión que pueden plantearse en función del reconocimiento de lenguajes que se sabe están en  $NP$  pero cuya pertenencia (o no pertenencia a  $P$ ) no se ha podido determinar todavía. Entonces, si  $P \neq NP$ , la posibilidad de encontrar soluciones algorítmicas eficientes para estos problemas se reduciría en forma considerable.

No obstante, debe admitirse que la relación entre la resolución de problemas de decisión y la aceptación de lenguajes en  $NP$  no se ha definido tan bien como para  $P$ . En  $P$ , la estrecha relación entre la resolución de problemas de decisión y la aceptación de lenguajes surgió como consecuencia de que la capacidad para aceptar un lenguaje en tiempo polinómico equivale a la capacidad para decidir el lenguaje en tiempo polinómico.

Los investigadores todavía no han resuelto la relación entre la aceptación y la decisión de lenguajes en tiempo polinómico en el contexto de las máquinas de Turing no deterministas. Por esto, el hecho de que un lenguaje en  $NP$  se encuentre

asociado a un problema de decisión específico no significa que sea posible resolver completamente el problema en tiempo polinómico con una máquina no determinista.

## **2.4. Técnicas de solución del problema**

Para solucionar un problema existen diversas técnicas algunas de las cuales se explicarán a continuación con la finalidad de dar un panorama más amplio sobre las técnicas a utilizar en este texto.

### **2.4.1. Técnicas tradicionales**

Los métodos de optimización que aquí se presentan se derivan de dos grupos de métodos de optimización: los directos (que no requieren más que los valores de la función objetivo), como simplex, y los de ascenso (que además, requieren los valores de la o las derivadas de la función), como el de Newton y el de ascenso de máxima pendiente. Existen otros muchos métodos dentro de esta clasificación que son bastante más útiles que los que se muestran aquí. Sin embargo, el objetivo de esta sección es presentar, con propósitos didácticos, un panorama representativo de los métodos de optimización no heurísticos. (KURI Morales y Galaviz Casas 2007)

#### **2.4.1.1. Método de Newton**

En los recursos elementales de cálculo diferencial se les enseña a los alumnos que, bajo ciertas condiciones, es posible encontrar los puntos del dominio de una función  $f: A \rightarrow B$  ( $A, B \in \mathbb{R}$ ), donde ésta alcanza sus valores extremos (máximos y mínimos) encontrando las soluciones de la ecuación:

$$f'(x)=0$$

donde  $f'$  denota la derivada de  $f$ .

#### **2.4.1.2. Búsqueda de Fibonacci**

Este método sirve para buscar el máximo o mínimo de funciones de  $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ . El objetivo es acotar el punto donde la función alcanza su valor extremo por intervalos cada vez más pequeños, de esta forma al final se obtiene un intervalo  $(x, x+\varepsilon)$  en cuyo interior está el punto buscado.

#### **2.4.1.3. Ascenso de máxima pendiente (Steepest ascent)**

En los cursos de cálculo diferencial de varias variables se enseña a los alumnos que el gradiente de una función  $f(x)$ , que se denota con  $\nabla f(x)$ , es un vector que apunta a la dirección de mayor crecimiento de  $f$ .

#### **2.4.1.4. Simplex**

Este es un método muy usual para resolver problemas de optimización de programación lineal. En éste se busca el punto donde una función lineal de varias variables (llamada función objetivo) tiene su máximo o mínimo cuando su dominio se ve restringido. Las variables deben tener cierto signo y sus valores deben satisfacer ciertas relaciones entre ellas, también lineales, expresadas como un conjunto de ecuaciones o desigualdades. Un ejemplo de problema de programación lineal es maximizar:

$$z = 2x_1 + 3x_2$$

restricciones

restricciones de signo

## **2.4.2. Técnicas de inteligencia artificial**

En ocasiones, las técnicas de solución tradicionales no son suficientes para la solución de un problema, ya sea porque contienen demasiadas variables o porque los cálculos demorarían mucho tiempo en hacerse incluso en una computadora, etc. existen técnicas que permiten acercarse a la solución óptima de un problema en poco tiempo y dar como resultado buenas soluciones. A continuación se hará mención de algunas de estas técnicas de solución.

### **2.4.2.1. Búsqueda Tabú**

Éste método de búsqueda utiliza cierta memoria o conocimiento acerca del dominio para encontrar una buena solución al problema que se pretende resolver, o una solución, al menos cercana a la óptima. El método se deriva del trabajo de Glover, y desde su creación ha recibido numerosas contribuciones y se han desarrollado algunas variantes.

Sea  $X$  el dominio de búsqueda relacionado con algún problema y sea  $x \in X$  una posible solución. Para buscar puntos mejores en  $X$  se define, de alguna manera conveniente, la vecindad de un punto cualquiera en  $X$ . De esta manera es posible buscar soluciones mejores que  $x$  entre sus vecinos, a los que se denotará con  $N(x)$ .

Conforme pasa el tiempo y se va explorando más el dominio, será conveniente excluir algunos puntos que se sabe no son buenos (para no buscar en vano). De manera que la vecindad de un punto  $x$  cambie con el tiempo, depende de la historia

( $H$ ) del proceso de búsqueda. Así que es conveniente denotar con  $N(x)$  solo a la vecindad inicial de  $x$  y, con  $N(H,x)$  la vecindad de  $x$  como función de la historia.

Algunos puntos que estaban en  $N(X)$  y que, al paso del tiempo, resulten no ser buenos candidatos de solución, serán marcados como *tabú* y no podrán ser alcanzadas desde  $x$ , es decir, no serán elementos de  $N(H,x)$ .

También, conforme transcurre el tiempo la función que evalúa la conveniencia de cada solución posible, se puede modificar y, en general, se denota con  $b(H,x)$ .

Al principio de la ejecución del algoritmo es deseable identificar regiones donde se obtienen buenas soluciones y regiones donde se obtienen malas. Esto es posible si se posee suficiente diversidad, es decir, si se procura la exploración. En etapas tardías del algoritmo es mejor hacer una búsqueda más intensiva dentro de las regiones buenas para aproximarse al óptimo. Esto es, en general, válido para varias heurísticas.

Cuando es costoso determinar qué elementos están en  $N(H,x)$  se selecciona una muestra representativa de la vecindad  $NC(H,x) \subseteq N(H,x)$ . En la búsqueda tabú de aleatoriedad es, si no ignorada, por lo menos minimizada. Es empleada de manera muy restringida en el entendimiento de la búsqueda ha de ser un proceso sistemático. Por supuesto, existe una variante llamada búsqueda tabú probabilística (*probabilistic tabu search*) en la que, a partir de un elemento  $x$ , se selecciona aleatoriamente el vecino que debe ser visitado a continuación. (KURI Morales y Galaviz Casas 2007)

#### **2.4.2.2. Algoritmos Genéticos**

Los Algoritmos Evolutivos son una técnica de resolución de problemas de búsqueda y optimización inspirada en la teoría de la evolución de las especies y la selección natural.

Estos algoritmos reúnen características de búsqueda aleatoria con características de búsqueda dirigida que provienen del mecanismo de selección de los individuos más adaptados. La unión de ambas características les permite abordar los problemas de una forma muy particular, ya que tienen capacidad para acceder a cualquier región del espacio de búsqueda, capacidad de la que carecen otros métodos de búsqueda exhaustiva, a la vez que exploran el espacio de soluciones de una forma mucho más eficiente que los métodos puramente aleatorios. (ARAUJO y Cervigón 2009)

Está claro que un algoritmo diseñado de forma específica para la resolución de un problema concreto será más eficiente que un algoritmo evolutivo, que es una técnica general de resolución. Pero existen muchas situaciones en las que no es posible contar con tales algoritmos.

#### **2.4.2.3. Recocido Simulado**

El recocido simulado (simulated annealing) es heurístico, y está basado en una analogía con el proceso físico seguido para obtener sólidos con configuraciones de energía mínima.

Fue propuesto por primera vez por Metropolis y usado en optimización combinatoria por Kirkpatrick. (KURI Morales y Galaviz Casas 2007)

La técnica está basada en los sólidos cristalinos que son los materiales más duros, y que esto se debe a que su estructura molecular es muy simétrica, es decir, posee mínima energía.

Una descripción de cómo se crean los sólidos cristalinos se detalla a continuación. Se calienta el sólido hasta hacerlo líquido y luego se le enfría muy lentamente para que las partículas de este se acomoden a su estado de mínima energía o en alguno cercano a éste. Si el enfriamiento no se hace cuidadosamente es más probable que no se alcance el estado de energía mínima. En este caso hay que volver a calentarlo (en general menos que la vez anterior) y volver a enfriarlo con lentitud.

El recocido simulado se adapta naturalmente a problemas de minimización. Evidentemente, el problema puede modificarse para convertirlo en uno de maximización, pero aquí se supondrá que se pretende resolver problemas de minimización. En términos muy generales, la simulación del proceso de recocido en el algoritmo citada por Kuri Morales y Galaviz Casas (2007) es la siguiente:

1. Sea  $E_i$  la energía actual. Se desplaza un poco una molécula del estado presente. Con esto se cambia su posición respecto a las demás y se altera la energía del sistema que ahora será  $E_{i+1} = E_i + \delta$ . El valor de  $\delta$  es calculado.
2. Si  $\delta < 0$  entonces el nuevo estado se acepta y es el nuevo estado actual. Si  $\delta \geq 0$  entonces el nuevo estado es aceptado con cierta probabilidad dada por:

—

donde  $T$  es la temperatura y  $K_B$  una constante física, conocida como constante de Boltzmann.

3. Si conforme transcurre el tiempo se disminuye lentamente la temperatura, entonces el sólido alcanza un equilibrio térmico en cada temperatura y la probabilidad de estar en el estado caracterizado  $E_i$  es:

— —

donde  $Z(T)$  es la función de partición definida como:

---

El algoritmo descrito con más detalle es mostrado a continuación. En éste,  $X$  es el dominio de búsqueda,  $T_0$  es la temperatura inicial,  $N(i)$  es el conjunto de vecinos de  $i$  y  $E(i)$  es la energía de la solución propuesta  $i$ .

#### **2.4.2.3.1. Process (Recocido)**

```
begin  
 $x = \text{selecc}(X)$   
elegir  $T_0$   
 $T = T_0$   
Repeat  
For (contador = 0) to  $L$  do  
elegir  $j \in N(i)$   
     $\delta = E(j) - E(i)$   
    If (( $\delta < 0$ ) OR (aleatorio[0, 1] <  $\exp(-\delta/T)$ ))  
        then  
             $i=j$   
        endif  
    endfor  
    reducir ( $T$ )  
    until (cond. termina)  
return ( $i$ )  
end
```

El estado actual del proceso en el recocido simulado depende sólo de su estado inmediato anterior. Esto ha hecho posible que se haga un análisis detallado de este

método utilizando cadenas de Markov y, de hecho, ha sido probado teóricamente que el algoritmo converge asintóticamente a la solución global óptima. (KURI Morales y Galaviz Casas 2007)

## Capítulo 3

# Desarrollo del Modelo

Durante la investigación fue necesario recabar cierta información que serviría como base para desarrollar el modelo de transporte, además de seguir un procedimiento que esclareciera los puntos a tratar sobre el tema para determinar su relevancia.

El proyecto fue llevado a cabo en dos partes, la primera consistió en elaborar una red de transporte que considerara los principales puntos por donde transita la mercancía que proviene de Asia y que atraviesa nuestro país con destino a Estados Unidos.

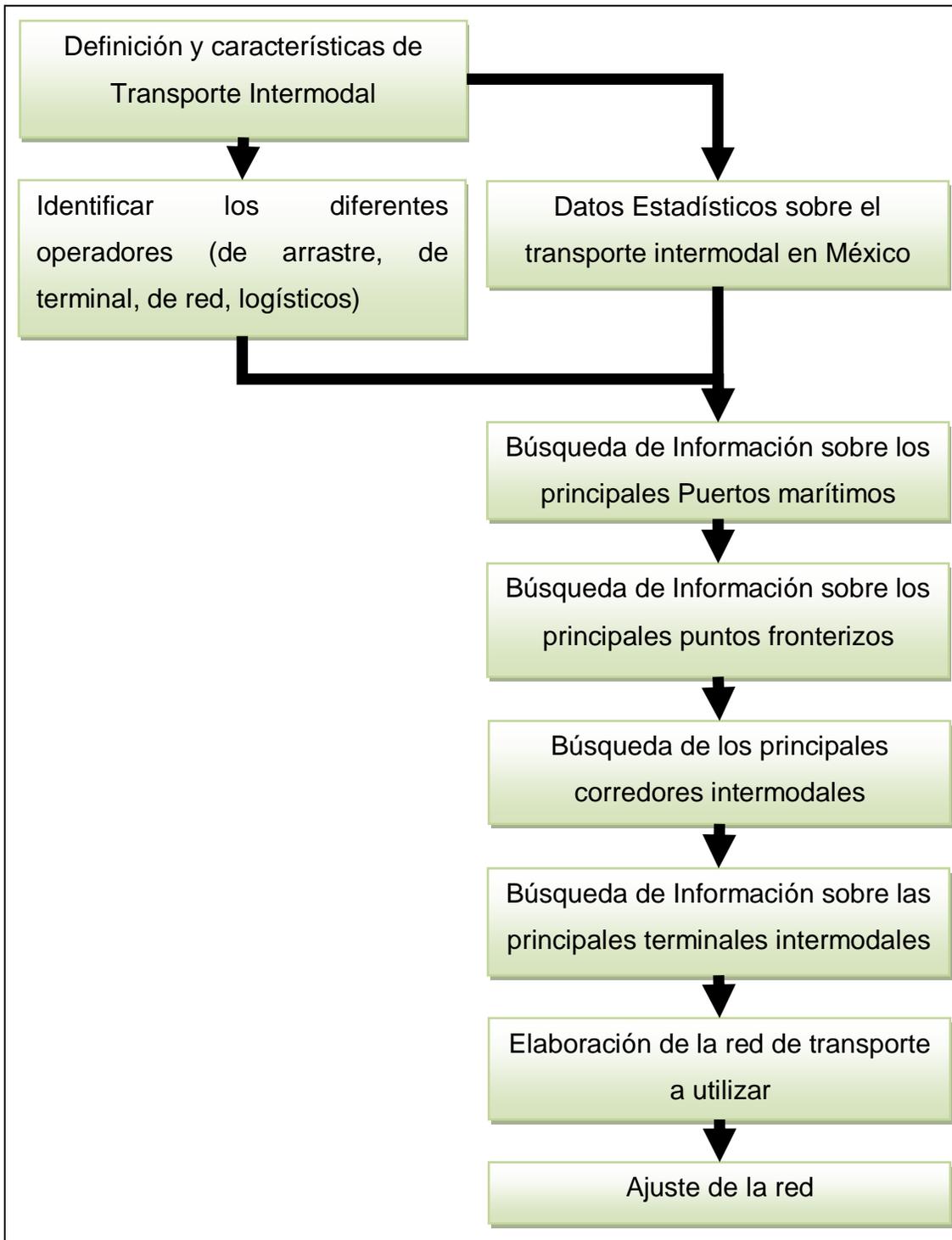
Para considerar los puntos importantes fue recabada información sobre los puertos marítimos concerniente a las características y el equipo con el que cuentan, además de datos estadísticos correspondientes a la cantidad de contenedores que maneja cada uno, así como su posición en el desempeño marítimo internacional.

Además se ubicaron los puntos correspondientes a las terminales intermodales ubicadas en el interior del país, las cuales contribuyen a realizar los intercambios de un modo a otro, para finalmente enviar la mercancía hacia Estados Unidos a través de la frontera que se tiene con este país.

Una vez considerada la red a la que hace referencia el problema, se adaptó a un modelo matemático para que la solución pudiera ser calculada en una computadora. Además también se exploraron distintas técnicas de solución considerando que una red de mayor tamaño en la que se consideren una mayor cantidad de productos así como las operaciones llevadas a cabo en el intercambio de modo, requerirían de una solución en un menor tiempo.

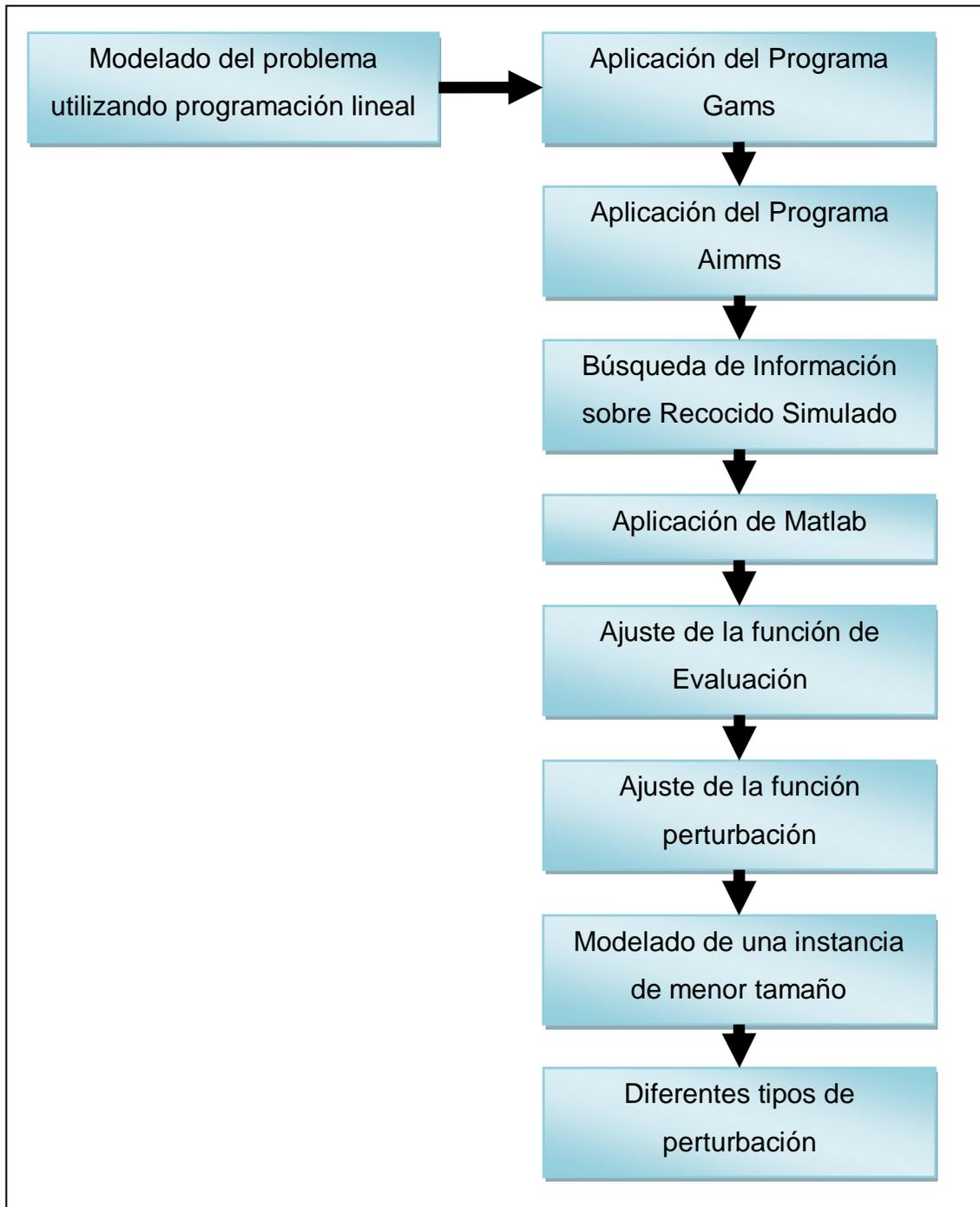
Por lo que la búsqueda de diferentes técnicas que permitan solucionar el problema resulta importante para su futura aplicación.

La Figura 3.1 hace referencia al trabajo de investigación documental realizado para obtener información sobre los temas de transporte y complejidad computacional, entre otros; misma que sirvió para comprender la situación del problema.



**Figura 3.1** Procedimiento para determinar la red de transporte intermodal en México

La Figura 3.2 ilustra la segunda parte del trabajo, en la que se llevó a cabo la formulación del modelo en su estructura matemática y su aplicación a los diferentes programas computacionales que facilitan su solución.



**Figura 3.2** Procedimiento para desarrollar el modelo de la red

## **2.5. Elaboración de la Red**

A continuación se describe brevemente el procedimiento para elaborar la red de transporte.

### **2.5.1. Definición y características de Transporte Intermodal**

Para adentrarse en el tema a analizar fue necesario hacer una búsqueda de información sobre los distintos tipos de transporte y cómo se llevan a cabo los procedimientos correspondientes al mismo.

La información correspondiente se muestra en el Marco Teórico de este documento. Esta información fue analizada para determinar cómo proceder a la construcción de la red, qué modos serían incluidos de acuerdo a las características del lugar al que serían aplicados, en este caso el transporte de contenedores de los puertos del pacífico a la frontera norte de México.

### **2.5.2. Diferentes operadores**

En el transporte intermodal convergen distintos actores dentro de los cuales se encuentran los operadores de arrastre, de terminal, de red, e intermodal; fue necesario determinar las actividades de cada uno para definir a quién beneficia el modelo a desarrollar.

### **2.5.3. Datos Estadísticos sobre el transporte intermodal en México**

Para fundamentar el desarrollo del modelo fue necesario verificar información sobre el transporte en México y sus intercambios comerciales con el continente asiático. Estos datos permiten analizar los puntos a incluir en la red del modelo. Entre los datos se encuentran los TEU's que transitan por cada arco desde los principales puertos del Pacífico al centro del país, y de este punto a la frontera norte de México.

### **2.5.4. Búsqueda de Información sobre los Puertos marítimos**

Para determinar los puertos que se iban a considerar en la red, fue necesario obtener información sobre los puertos marítimos más importantes del país, de los cuales fueron posteriormente seleccionados los puertos del pacífico. Los principales datos a tomar en cuenta fueron los siguientes:

- Características
- Volumen
- Puntos de llegada
- Infraestructura
- Flujos de mercancía
- Compañías que laboran

### **2.5.5. Búsqueda de Información sobre los puntos Fronterizos**

Para identificar los puntos fronterizos a tomar en la red, también fue necesario ubicar los puntos en el mapa, he identificar cuáles son los más transitados de acuerdo con los datos estadísticos; de esta manera sería más fácil identificar los corredores y por lo tanto las vías a utilizar para transitar los productos, además obtener información de

los lugares en donde los productos cambian de un país a otro, ya que son necesarios ciertos procedimientos gubernamentales (aduanas, etc.).

#### **2.5.6. Búsqueda de los principales corredores intermodales**

Para trazar las rutas más fácilmente se tomó información de los principales corredores de transporte y se comparó con la ya obtenida para combinarlas y obtener un solo modelo. Se tomó registro de los corredores esperados para 2012, además se tomaron en cuenta solo aquellos que coinciden con la ruta de los puertos principales del Pacífico a la frontera Noreste de México con Estados Unidos.

#### **2.5.7. Búsqueda de Información sobre las principales terminales intermodales**

Para determinar cuáles serían las terminales a tomarse en cuenta se identificaron las de mayor flujo y que se ubicaran sobre los corredores considerados por el transporte y en los destinos de los principales puertos marítimos. También se identificaron las características de cada terminal, para decidir si eran competentes en el estudio.

#### **2.5.8. Elaboración de la red de transporte a utilizar**

Finalmente con todos los datos obtenidos, se obtuvieron los datos correspondientes a las distancias entre cada punto para cada modo, además en el modo ferroviario fueron diferenciadas las dos empresas concesionarias que laboran en las vías tomadas en cuenta; finalmente se dio forma a la red de transporte a utilizar en el modelo.

### **2.5.9. Ajuste de la red**

Una vez que se tuvo la primera aproximación de la red, se eliminaron algunos puntos, considerados innecesarios ya que únicamente les precedía y seguía un nodo (ciudad, terminal) únicamente, por lo que no habría ninguna decisión que tomar entre ambos puntos.

## **2.6. Modelado del problema**

Una vez que se obtuvo la red se modeló matemáticamente utilizando programación lineal, el procedimiento para obtener resultados es el siguiente:

### **2.6.1. Aplicación del Programa Gams**

Para obtener resultados del modelo se introdujo al programa Gams que mediante el solver Siplex arrojó resultados al problema. La instancia en la cual se planteó el problema fue pequeña y no se introdujeron todas las variables esperadas del modelo, esto debido a las limitaciones de programación lineal.

### **2.6.2. Aplicación del Programa Aimms**

Debido a la necesidad de obtener resultados un tanto más gráficos del modelo, fue implementado también en el programa Aimms, con las mismas variables introducidas previamente en Gams.

### **2.6.3. Análisis del Algoritmo de Recocido**

Fue analizado el código de recocido simulado aplicado antes por el Sergio Caballero para adaptarlo al problema que se está tratando en este trabajo; esto de acuerdo con los resultados que ha tenido antes el Grupo de Investigación al aplicar este algoritmo.

### **2.6.4. Aplicación de Matlab**

Una vez que se comprendió el funcionamiento del algoritmo fue implementado en el programa que serviría para solucionarlo, en este caso el programa Matlab. Partiendo de las investigaciones realizadas previamente se utilizó el mismo código, cambiando solamente el valor de alpha y el número de iteraciones, además de algunas gráficas necesarias para verificar el funcionamiento del algoritmo.

### **2.6.5. Ajuste de la función de Evaluación**

Para obtener resultados sobre el modelo, fue necesario ajustar la función de evaluación del algoritmo, utilizando las bases de la programación lineal aplicadas previamente en los programas Gams y Aimms, agregando una penalización cuando no se cumplen las restricciones del problema, generando un valor más alto de la función objetivo haciendo que la solución obtenida se aleje de la óptima.

### **2.6.6. Ajuste de la función perturbación**

Para modificar la solución cada vez que se realiza la búsqueda es necesaria una función que realice cambios en ella, con lo cual fue necesario programar una que

realice estos cambios de manera aleatoria, ya que hasta ahora no se conoce otra forma que genere mejores resultados para este modelo.

### **2.6.7. Modelado de una instancia de menor tamaño**

Debido a que el problema resultó muy grande para ajustar la función perturbación, fue necesario trabajar un modelo de transporte más sencillo, al cual se le aplicaran únicamente dos nodos de oferta, uno de transbordo y dos de demanda; además de incluir los tres modos de transporte con la finalidad de que posteriormente se agregue una penalización cuando se realiza un cambio de modo, debido a los recursos utilizados para esta operación (tiempo, costo, capacidad, etc.), ya que en el modelo los cambios sólo se realizan tomando en cuenta los costos de cada modo de acuerdo a la distancia correspondiente por recorrer.

### **2.6.8. Diferentes tipos de perturbación**

Una vez que se tuvo una instancia de menor tamaño se aplicaron modificaciones a la función de perturbación del algoritmo, que a continuación se mencionan:

- Modificar todas las celdas con una distribución de probabilidad de normal.
- Modificar una línea con una distribución normal eligiendo una fila al azar.
- Modificar sólo las líneas que superen la distribución normal.

Capítulo 4

# Aplicación del Método

### **3.1. Elaboración de la Red**

Se citan a continuación los resultados obtenidos al realizar la búsqueda de información.

#### **3.1.1. Definición y características de Transporte Intermodal**

La información obtenida sobre transporte intermodal fue presentada en el marco teórico. A continuación se presenta un diagrama sobre transporte intermodal, los modos de transporte y los tipos de contenedores.

#### **3.1.2. Diferentes operadores**

Los problemas de planeación en el transporte de carga intermodal pueden ser relacionados a cuatro tipos de creadores de decisión, basados en las cuatro actividades principales en el transporte de carga intermodal.

1. Los operadores de arrastre organizan la planeación y programación para los camiones entre terminales y los distribuidores y clientes.
2. Los operadores de terminal administran las operaciones de transbordo desde autotransporte a ferrocarril o embarcación, o de ferrocarril a ferrocarril o embarcación a embarcación.
3. Los operadores de red son responsables de la planeación de la infraestructura y organización del transporte de ferrocarril o embarcación.
4. Los operadores intermodales pueden ser considerados como usuarios de la infraestructura intermodal y servicios y seleccionar la ruta más apropiada para envíos a través de toda la red intermodal.

Cada tipo de operador de decisión se enfrenta con problemas de planeación en diferentes horizontes de tiempo.

- A largo plazo, la planeación estratégica involucra el más alto nivel de administración y requiere grandes inversiones de capital a largos horizontes de tiempo. Las decisiones en este nivel de planeación afectan el diseño de la infraestructura física de la red.
- A mediano plazo, los objetivos de planeación táctica aseguran, sobre un horizonte a mediano plazo, una ubicación eficiente y razonable de recursos existentes con el fin de mejorar el desempeño del sistema completo.
- A corto plazo, la planeación operativa es desarrollada por la administración local en un ambiente altamente dinámico donde el factor tiempo juega un papel importante. El aspecto dinámico de las operaciones se complica aún más por la estocasticidad inherente al sistema. En la realidad la administración operativa se caracteriza por la incertidumbre.

De acuerdo con esto, el operador a quien sería útil el modelo es el operador intermodal ya que considera las decisiones a tomar para reducir los costos de toda la red de transporte.

### **3.1.3. Datos Estadísticos sobre el transporte intermodal en México**

La cantidad de contenedores que circulan anualmente por los puertos marítimos del país. Los puertos han ido creciendo para adaptarse a las necesidades del mercado comercial a medida que el transporte de contenedores ha cobrado cada vez mayor importancia en el comercio de carga entre Asia y México, por lo que cada día deben ser más competitivos para ser considerados en el comercio internacional.

La evolución de los puertos del pacífico ha sido notable a través de los años como se muestra en la Figura 4.1 en la cual los principales puertos son Lázaro Cárdenas y

Manzanillo. De igual forma se nota la falta de inversión a la infraestructura ferroviaria, ya que el mayor movimiento se realiza por camión. Y es que no ha habido inversión a la red ferroviaria desde hace muchos años; por lo que las empresas en desarrollo aún no deciden arriesgarse a una inversión en este sector, y es por ello que en los puertos el desarrollo y la tecnología se ha destinado para maquinaria y equipo que favorecen al autotransporte, dejando de lado el movimiento ferroviario.

También en la Figura 4.2 se distingue que la carga contenerizada ha crecido un tanto por ciento más que la carga en general, demostrando que las empresas buscan cada vez más practicidad y seguridad para sus envíos.

En la Figura 4.3 puede observarse la tendencia de crecimiento en la utilización de contenedores para la movilización de carga en las importaciones. Esto permite una mayor flexibilidad ya que los contenedores son desconsolidados hasta que llegan al cliente, lo que permite ahorrar una gran cantidad de operaciones en su traslado.

En la Figura 4.4 se observa que la tendencia a utilizar contenedores es alta pero sigue dominando la carga general, esto se debe al tipo de productos que se comercializan en el país. Por lo tanto sigue siendo mayor la cantidad de contenedores que entran al país.

El modelo atiende a la tendencia creciente a utilizar contenedores para el transporte de mercancía, ya que se hace necesario disminuir los costos para llevarlos a su destino.

En la Figura 4.5 se observan la red del sistema de transporte ferroviario, ésta resulta deficiente al día de hoy ya que estuvo mucho tiempo sin inversión en mejoras. Aún cuenta con una sola vía lo que no permite un mayor aprovechamiento de la red.

El proyecto pretende brindar un panorama más amplio para decidir sobre una opción menos costosa y más segura de transporte, razón que con el tiempo contribuya a una mayor inversión en infraestructura ferroviaria.

CUADRO 2.4.5																		
EVOLUCIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CARGA MARÍTIMA-TERRESTRE EN TRÁFICO DE IMPORTACIÓN <sup>(1)</sup>																		
(MILES DE TONELADAS)																		
LITORAL	1998			2000			2002			2004			2005			2006		
	TON (9)	FFCC (10)	CAMION (8)	TON (9) (7)	FFCC (10)	CAMION (8)	TON (9)	FFCC (10)	CAMION (8)									
<b>PUERTOS DEL GOLFO</b>																		
ALTAMIRA	3,010	137	2,873	4,196	236	3,960	5,014	2,485	3,331	6,136	2,383	3,753	6,769	2,243	4,526	8,106	1,954	6,153
TAMPICO	1,542	1,092	450	1,271	1,227	44	1,589	1,053	1,066	1,853	794	1,060	2,155	973	1,182	2,060	146	1,914
TUXPAN (2)	1,256	0	1,256	1,573	0	1,573	1,268	0	1,521	941	0	941	1,108	0	1,108	1,508	0	1,508
VERACRUZ	9,106	4,410	4,696	11,308	5,734	5,574	11,707	5,847	6,632	12,506	5,963	6,543	12,903	6,122	6,781	14,225	4,309	9,917
COATZACOALCOS	1,139	191	948	1,321	280	1,041	1,328	330	903	1,476	553	923	1,466	294	1,173	1,601	431	1,170
PAJARITOS (2)	1,644	0	1,644	1,600	0	1,600	1,653	0	0	2,386	0	2,386	2,068	0	2,068	1,840	0	1,840
PROGRESO	1,395	0	1,395	1,660	0	1,660	1,687	0	1,663	1,722	0	1,722	1,884	0	1,884	1,775	0	1,775
OTROS	54	0	54	90	0	90	95	0	3,053	77	0	77	296	0	296	86	0	86
<b>TOTAL GOLFO (1)</b>	<b>19,147</b>	<b>5,830</b>	<b>13,317</b>	<b>23,020</b>	<b>7,477</b>	<b>15,543</b>	<b>24,340</b>	<b>9,725</b>	<b>18,168</b>	<b>27,098</b>	<b>9,692</b>	<b>17,406</b>	<b>28,649</b>	<b>9,631</b>	<b>19,018</b>	<b>31,201</b>	<b>6,839</b>	<b>24,362</b>
<b>% DEL TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>30.4%</b>	<b>69.6%</b>	<b>100%</b>	<b>32.5%</b>	<b>67.5%</b>	<b>100%</b>	<b>34.9%</b>	<b>65.1%</b>	<b>100%</b>	<b>35.8%</b>	<b>64.2%</b>	<b>100%</b>	<b>33.6%</b>	<b>66.4%</b>	<b>100%</b>	<b>21.9%</b>	<b>78.1%</b>
<b>PUERTOS DEL PACIFICO</b>																		
ENSENADA (2)	36	0	36	135	0	135	118	0	212	263	0	263	420	0	420	620	0	620
GUAYMAS	895	138	757	265	178	87	295	1	152	105	123	(18)	228	218	10	303	240	63
MAZATLÁN	25	0	25	69	0	69	125	0	177	270	73	198	250	79	172	321	79	242
MANZANILLO	3,007	651	2,356	4,662	1,515	3,147	4,757	641	4,929	6,293	3,100	3,192	6,326	2,744	3,582	8,851	3,625	5,226
LÁZARO CÁRDENAS	7,502	1,995	5,507	7,322	3,098	4,224	6,726	383	8,777	8,567	355	8,213	11,106	462	10,644	12,546	964	11,582
ACAPULCO (2)	2	0	2	4	0	4	7	0	6	0.1	0	0	0.01	0	0	0.003	0	0
SALINA CRUZ (8)	22	0	22	64	0	64	58	0	56	36	0	36	29	0	29	24	0	24
OTROS	220	0	220	289	-	289	383	0	274	389	0	389	412	0	412	451	0	451
<b>TOTAL PACIFICO (1)</b>	<b>11,708</b>	<b>2,784</b>	<b>8,924</b>	<b>12,810</b>	<b>4,789</b>	<b>8,021</b>	<b>12,469</b>	<b>1,025</b>	<b>14,583</b>	<b>15,923</b>	<b>3,650</b>	<b>12,273</b>	<b>18,772</b>	<b>3,502</b>	<b>15,270</b>	<b>23,116</b>	<b>4,909</b>	<b>18,208</b>
<b>% DEL TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>23.8%</b>	<b>76.2%</b>	<b>100%</b>	<b>37.4%</b>	<b>62.6%</b>	<b>100%</b>	<b>6.6%</b>	<b>93.4%</b>	<b>100%</b>	<b>22.9%</b>	<b>77.1%</b>	<b>100%</b>	<b>18.7%</b>	<b>81.3%</b>	<b>100%</b>	<b>21.2%</b>	<b>78.8%</b>
<b>TOTAL NACIONAL (1)</b>	<b>30,855</b>	<b>8,614</b>	<b>22,241</b>	<b>35,830</b>	<b>12,266</b>	<b>23,564</b>	<b>36,809</b>	<b>10,750</b>	<b>32,751</b>	<b>43,021</b>	<b>13,342</b>	<b>29,679</b>	<b>47,421</b>	<b>13,133</b>	<b>34,288</b>	<b>54,317</b>	<b>11,747</b>	<b>42,570</b>
<b>% DEL TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>27.9%</b>	<b>72.1%</b>	<b>100%</b>	<b>34.2%</b>	<b>65.8%</b>	<b>100%</b>	<b>24.7%</b>	<b>75.3%</b>	<b>100%</b>	<b>31.0%</b>	<b>69.0%</b>	<b>100%</b>	<b>27.7%</b>	<b>72.3%</b>	<b>100%</b>	<b>21.6%</b>	<b>78.4%</b>

NOTAS: (1) No incluye petróleo y derivados.  
(2) No cuenta con enlaces ferroviarios en el puerto.

FUENTES: (3) Registros oficiales de la Dirección General de Marina Mercante, SCT.  
(4) Registros oficiales de la Dirección General de Puertos, SCT.  
(5) Elaboración propia con base en registros oficiales de Ferrocarriles Nacionales de México. (Informe E-6)  
(6) Cifras estimadas, obtenidas por la diferencia entre los reportes de Puertos y Ferrocarriles.  
(7) No coincide con ediciones anteriores de este Manual, debido a rectificaciones de la fuente.  
(8) Existen incongruencias con los datos reportados por las propias fuentes para el puerto de Salina Cruz en el año de 1996.  
(9) Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, SCT.  
(10) Dirección General de Tarifas, Transporte Ferroviario y Multimodal, SCT.

Figura 4.1 Evolución de la transferencia de carga marítima-terrestre en tráfico de importación.

Fuente: Manual Estadístico del Sector Transporte 2009

CUADRO 3.4.3														
EVOLUCIÓN DE LAS IMPORTACIONES Y EXPORTACIONES EN LA CARGA MARÍTIMA CONTENERIZADA														
	(3)	(3)(4)	(6)	(6)	(5)	(5)	(5)	(5)						TCMA
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	2000	2002	2004	2005	2006	2007	2008	93-08
<b>TOTAL CARGA GENERAL ALTURA</b> (MILES DE TONELADAS) (1)	9,103.0	9,655.0	11,350.6	12,391.0	13,721.0	15,009.0	17,623.4	19,843.2	23,355.9	24,978.5	30,780.1	32,303.7	35,436.6	9.5%
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
EN IMPORTACIÓN % DEL TOTAL	4,751.0 52.2%	4,834.0 50.1%	3,136.8 27.6%	3,873.0 31.3%	4,782.1 34.9%	6,486.3 43.2%	8,923.4 50.6%	11,603.3 58.5%	13,559.9 58.1%	14,541.9 58.2%	18,502.3 60.1%	17,815.0 55.1%	18,211.6 51.4%	9.4%
EN EXPORTACIÓN % DEL TOTAL	4,352.0 47.8%	4,821.0 49.9%	8,213.8 72.4%	8,518.0 68.7%	8,938.8 65.1%	8,522.7 56.8%	8,700.0 49.4%	8,239.9 41.5%	9,796.0 41.9%	10,436.6 41.8%	12,277.8 39.9%	14,488.7 44.9%	17,225.0 48.6%	9.6%
<b>TONELADAS DE CARGA</b> <b>CONTENERIZADA (MILES)</b> (2)	3,602.4	5,279.9	5,351.5	6,039.0	6,662.1	7,247.3	9,943.1	11,807.1	14,537.7	15,869.5	20,354.3	22,940.1	25,764.2	14.0%
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
EN IMPORTACIÓN % DEL TOTAL	2,046.1 56.8%	2,945.7 55.8%	2,165.1 40.5%	2,534.0 42.0%	2,962.5 44.5%	3,739.9 51.6%	5,484.4 55.2%	7,255.9 61.5%	8,776.1 60.4%	9,697.0 61.1%	12,244.8 60.2%	12,952.6 56.5%	13,779.4 53.5%	13.6%
EN EXPORTACIÓN % DEL TOTAL	1,556.3 43.2%	2,334.2 44.2%	3,186.4 59.5%	3,505.0 58.0%	3,699.5 55.5%	3,507.3 48.4%	4,458.7 44.8%	4,551.3 38.5%	5,761.6 39.6%	6,172.5 38.9%	8,109.5 39.8%	9,987.5 43.5%	11,984.8 46.5%	14.6%
<b>NÚMERO DE CONTENEDORES</b> <b>CARGADOS</b>	200,790	262,107	258,933	318,106	418,673	458,300	609,400	705,033	867,357	960,861	1,229,974	1,378,194	1,535,092	14.5%
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
EN IMPORTACIÓN % DEL TOTAL	117,465 58.5%	154,648 59.0%	105,139 40.6%	131,242 41.3%	188,818 45.1%	232,264 50.7%	346,280 56.8%	436,354 61.0%	528,267 60.9%	592,200 61.6%	747,713 60.8%	808,536 58.7%	855,566 55.7%	14.2%
EN EXPORTACIÓN % DEL TOTAL	83,325 41.5%	107,459 41.0%	153,794 59.4%	186,864 58.7%	229,855 54.9%	226,036 49.3%	263,120 43.2%	268,679 38.1%	339,090 39.1%	368,661 38.4%	482,261 39.2%	569,658 41.3%	679,526 44.3%	15.0%

NOTAS (1) Incluye productos perecederos.  
(2) Incluye la tara de los contenedores cargados.  
(3) No coincide con ediciones anteriores de este Manual, por rectificaciones de la fuente o debido a correcciones.  
(4) No coincide con los cuadros 3.4.1 y 3.4.4, debido a inconsistencias en la información.  
(5) No coincide con ediciones anteriores, debido a que se actualizaron los registros preliminares de la Dirección General de Puertos, SCT.  
(6) Registros Preliminares de la Dirección General de Puertos, SCT.

FUENTES: Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, SCT.  
Dirección General de Puertos, SCT.  
Dirección General de Marina Mercante, SCT.

Figura 4.2 Evolución de las importaciones y exportaciones en la carga marítima contenerizada

Fuente: Manual Estadístico del Sector Transporte 2009

# IMPORTACIONES

MILES DE TONELADAS

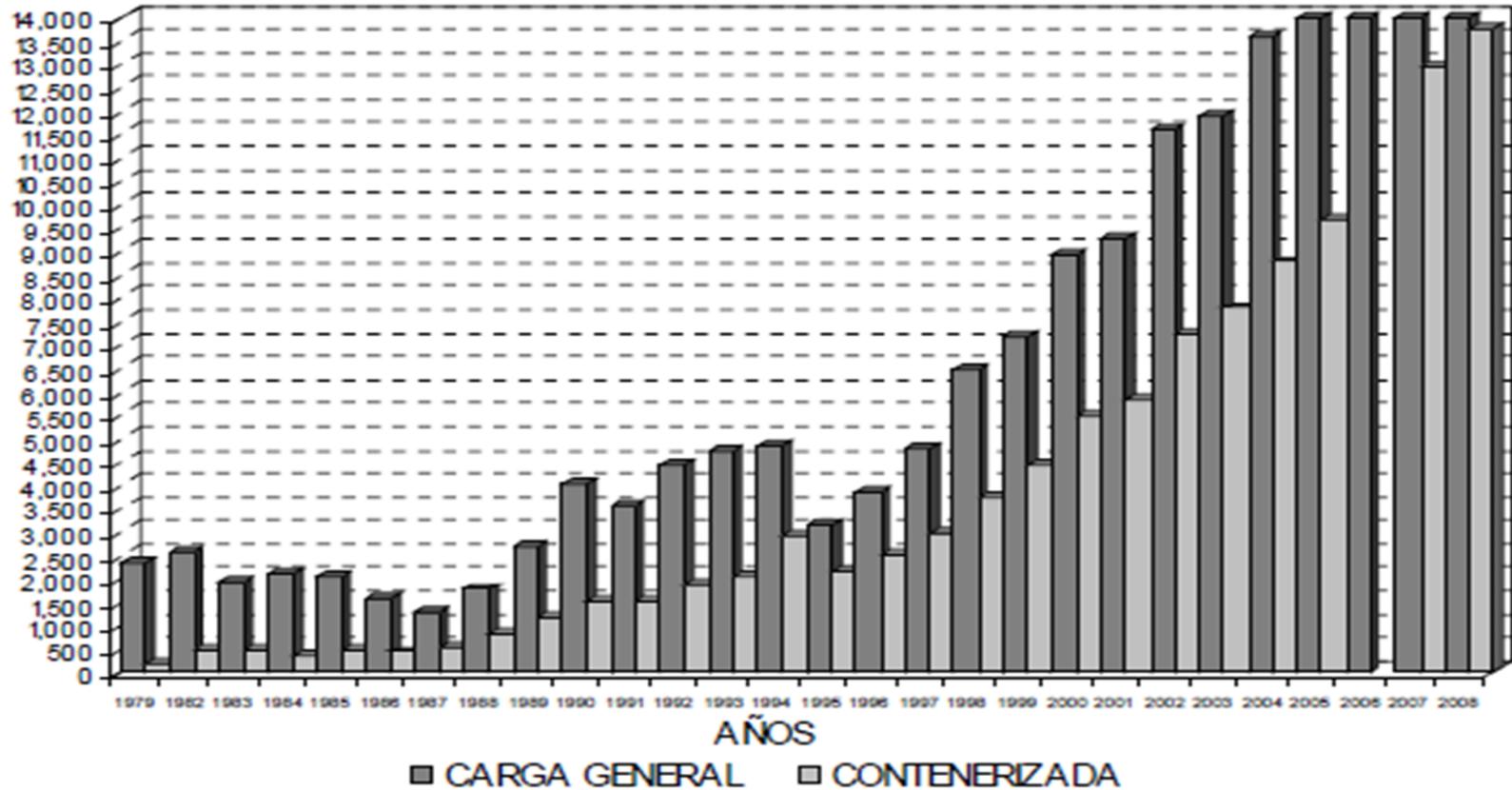


Figura 4.3 Importaciones en miles de toneladas  
Fuente: Manual Estadístico del Sector Transporte 2009

# EXPORTACIONES

MILES DE TONELADAS

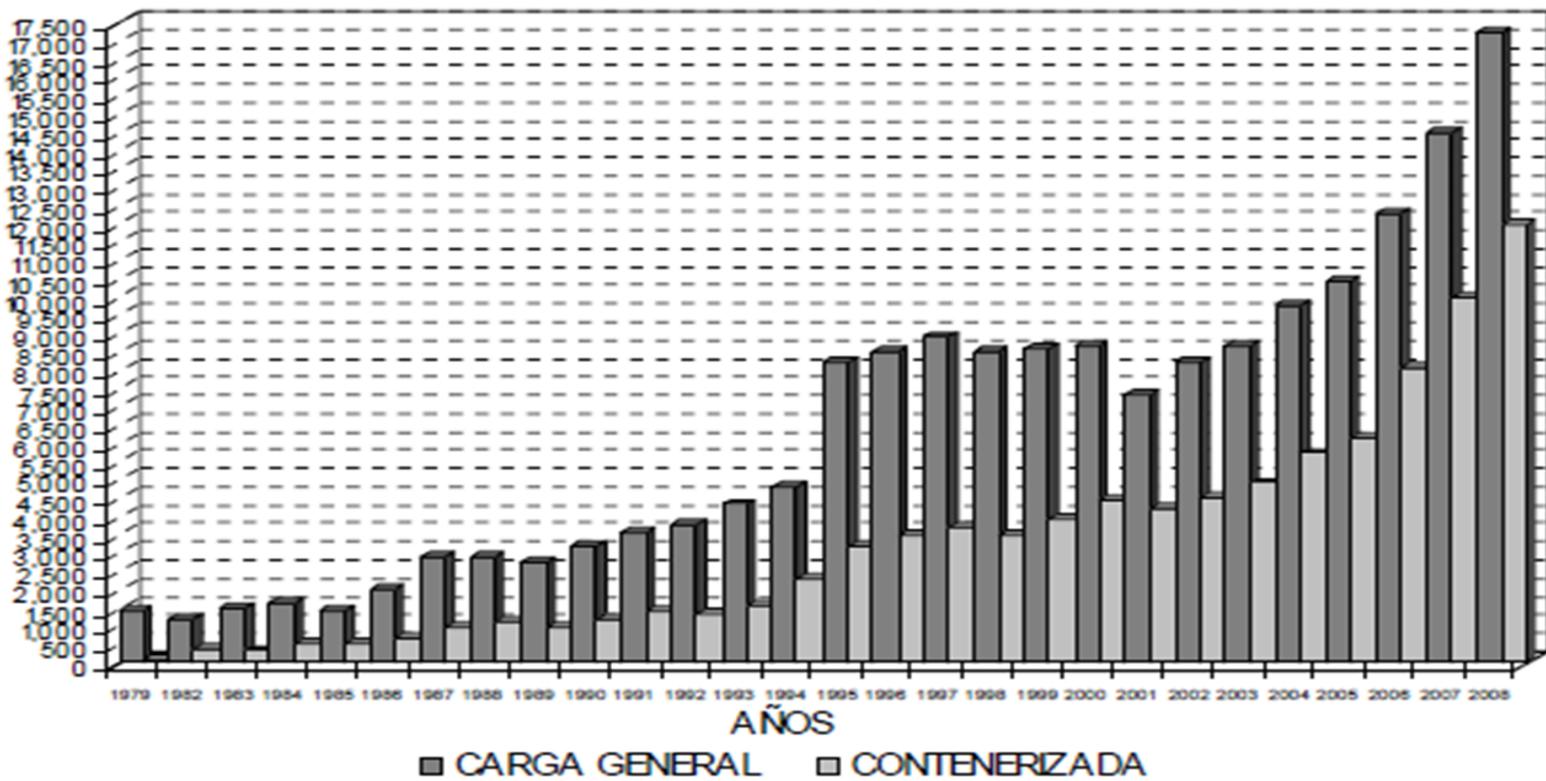


Figura 4.4 Exportaciones en miles de toneladas  
Fuente: Manual Estadístico del Sector Transporte 2009



**Figura 4.5** Sistema ferroviario de México

Fuente: Grupo Fidalex S. A. de C. V. <http://cargainfo.com>

La Figura 4.6 y la Figura 4.7 ilustran las líneas ferroviarias concesionadas a la empresa Ferromex y a la empresa Kansas City Southern México, respectivamente.



**Figura 4.6** Mapa del Sistema Ferroviario de la Concesionaria Ferromex  
Fuente: Grupo Fidalex S. A. de C. V. <http://cargainfo.com>



**Figura 4.7** Mapa del Sistema Ferroviario de la Concesionaria Kansas City Southern Mexico  
Fuente: Grupo Fidalex S. A. de C. V. <http://cargainfo.com>



**Figura 4.8** Red federal de carreteras de México  
 Fuente: Grupo Fidalex S. A. de C. V. <http://cargainfo.com>

Los principales ramales de carreteras utilizados en el proyecto se muestran en las siguientes figuras.



**Figura 4.9** Ramal de carreteras de Manzanillo y Lázaro Cárdenas a Tampico  
Fuente: Grupo Fidalex S. A. de C. V.



**Figura 4.10** Ramal D.F. – Piedras Negras v Nuevo Laredo  
Fuente: Grupo Fidalex S. A. de C. V.



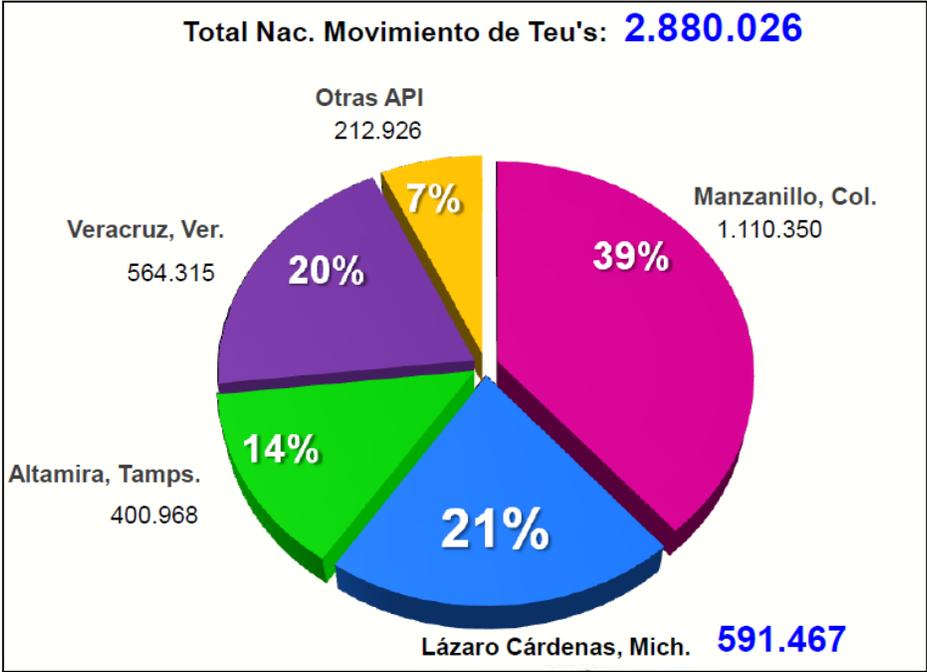
**Figura 4.11** Ramal Querétaro- Cd. Juárez  
 Fuente: Grupo Fidalex S. A. de C. V.

### 3.1.4. Búsqueda de Información sobre los Puertos Marítimos

Debido al crecimiento del comercio con el continente Asiático los puertos del Pacífico han tenido un mayor desarrollo que los del Golfo en los últimos años, sobre todo en el movimiento de contenedores. En la Figura 4.12 se identifica el dominio de los puertos del Pacífico en este sector.

En 1993 se decretó en México la nueva Ley de Puertos que dio origen a la creación de las Administraciones Portuarias Integrales con ello se ha incrementado el desarrollo el cual contribuye a ampliar las posiciones de atraque, la profundidad del canal y la maquinaria y equipo necesarios para recibir a buques cada vez más grandes. Además impulsa la competitividad de los puertos y con ello la economía del país; debido a que las empresas pueden disminuir sus costos al obtener un mejor servicio y tarifas.

Desde la entrada en funcionamiento de las Administraciones Portuarias Integrales, los puertos mexicanos se vuelven autosuficientes, los recursos que se generan son invertidos nuevamente en los puertos, convirtiéndose los derechos de puerto, atraque, muellaje y almacenaje, en tarifas por uso de infraestructura. A partir de ese momento, los puertos dejan de ser subsidiados, volviéndose más productivos y competitivos.



**Figura 4.12** Gráfica del Movimiento de contenedores en los Puertos de México. Ene-Dic 2009 TEU's  
 Fuente: /aapa.files.cmsPlus.com (comunicado SCT).

**4.1.4.1. Lázaro Cárdenas**

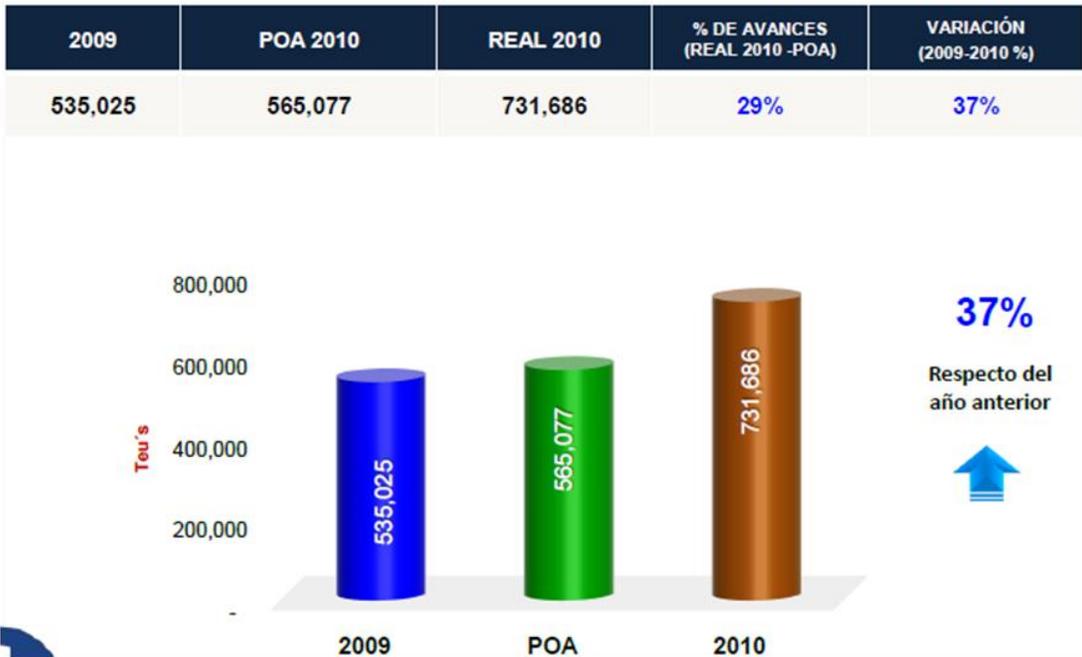
La ubicación estratégica de Lázaro Cárdenas, así como sus ventajas competitivas, como la de ser el puerto más profundo en el Sistema Portuario Mexicano, le han valido su condición actual como puerto reconocido en la operación de contenedores. En los últimos años se han realizado fuertes inversiones en nuevas instalaciones para el manejo de carga contenerizada.

En cuanto a sus características físicas, Lázaro Cárdenas posee una infraestructura adecuada y áreas disponibles para el desarrollo. Además de ser el único puerto en México en recibir buques de séptima generación.

El corredor intermodal que va desde Lázaro Cárdenas hasta el puerto seco de Kelly en San Antonio, Texas vuelve al puerto capaz de competir con los puertos del oeste de EE. UU. para la distribución de mercancías provenientes de Asia.

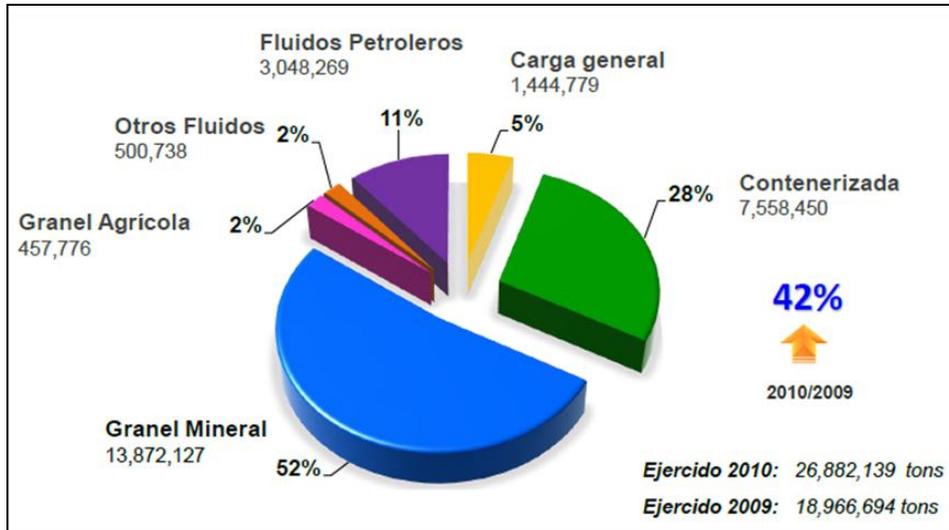
Además el tránsito de mercancías por el Puerto Lázaro Cárdenas en los últimos años es más ágil y sencillo debido a las significativas mejoras que se introdujeron en los trámites de despacho aduanal. Por lo general, un barco que llega a este puerto es despachado como máximo en 3 días, mientras que en otros puertos, esta operación lleva hasta 6 días.

En la Figura 4.13 se muestra el crecimiento en el manejo de contenedores en el puerto.



**Figura 4.13** Movimiento de Contenedores. Real Noviembre 2010-2009 POA 2010  
Fuente: Administración Portuaria Integral de Lázaro Cárdenas

En la Figura 4.14 se identifica que la carga contenerizada ocupa el segundo lugar en el total de carga operada en el 2010 en el puerto de Lázaro Cárdenas.



**Figura 4.14** Participación por tipo de carga operada. Toneladas Operadas a Noviembre 2010  
Fuente: Administración Portuaria Integral de Lázaro Cárdenas

El corredor Nafta va desde Lázaro Cárdenas hasta Kansas City y esta favorecido por su ubicación geográfica y las instalaciones del puerto.



**Figura 4.15** Corredor Nafta

#### **4.1.4.2. Manzanillo**

El Puerto de Manzanillo ofrece múltiples ventajas para los usuarios entre las que se puede mencionar los cinco cruces ferroviarios internacionales con Estados Unidos. El servicio de tren es de doble estiba en ruta fija y comunica Manzanillo con las principales ciudades de México, brindando mayor seguridad en el transporte de carga contenerizada.

Manzanillo junto con otros tres puertos del Pacífico Mexicano, fueron autorizados para la implementación de corredores fiscales logísticos que permiten agilizar el tránsito de mercancías provenientes de Asia, que tienen como destino la costa este de los Estados Unidos.

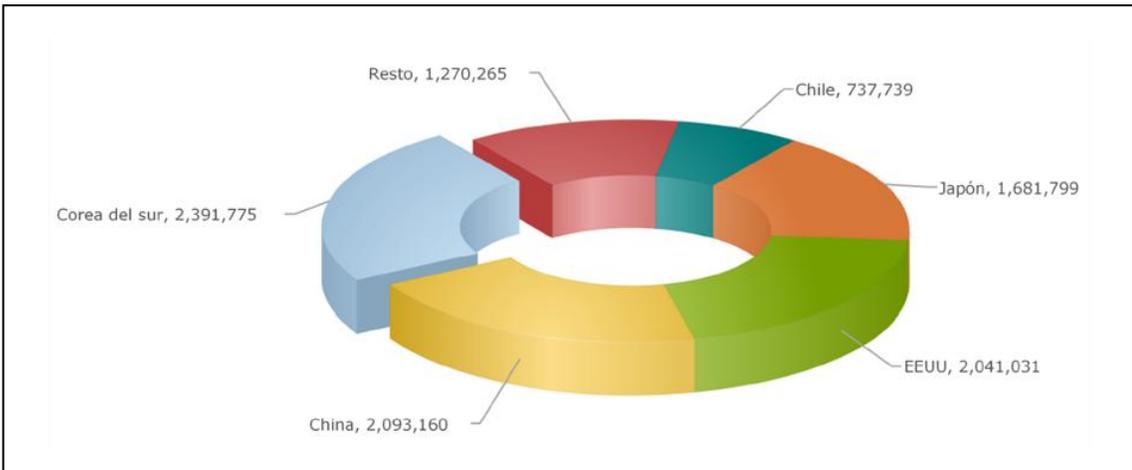
Actualmente ciertos trámites pueden realizarse vía electrónica para facilitar aún más la actividad del usuario del Puerto de Manzanillo.

El Puerto de Manzanillo es una alternativa para las líneas navieras que no pueden recalar en las terminales de la Costa Oeste de Estados Unidos. Las principales rutas se observan en la Figura 4.16.



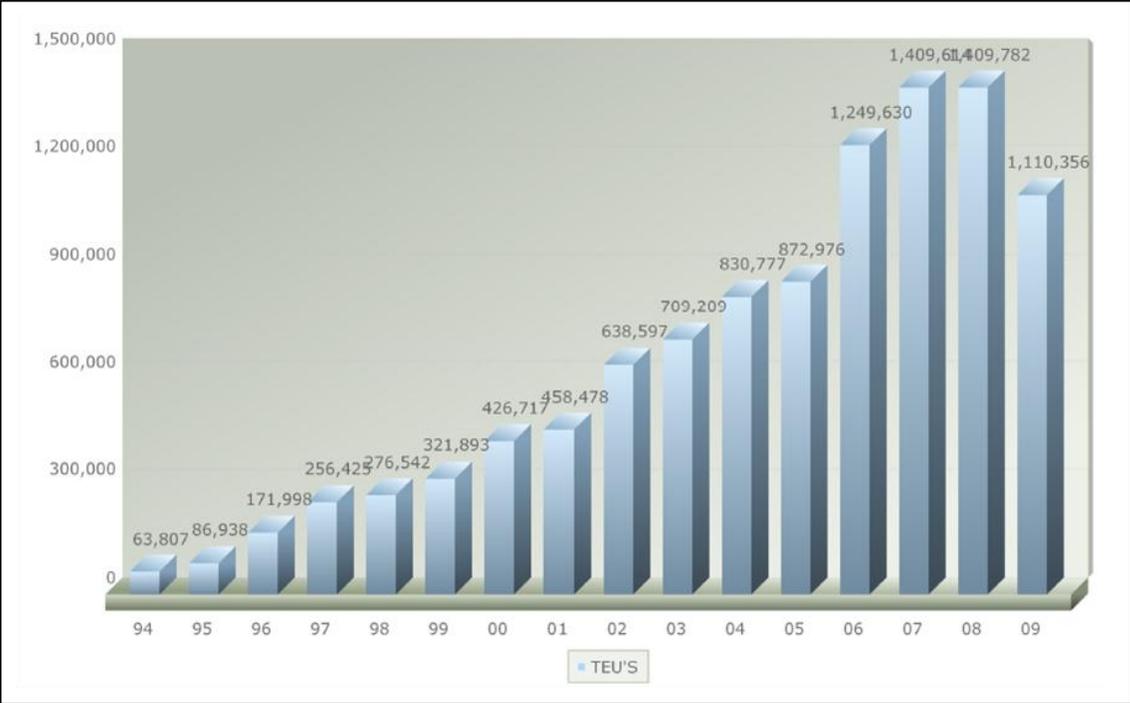
**Figura 4.16** Rutas de Importación al puerto de Manzanillo  
Fuente: Administración Portuaria Integral de Manzanillo

En la Figura 4.17 se observa que los principales países a los que México importa mercancías por el puerto de Manzanillo son Corea del Sur y China.

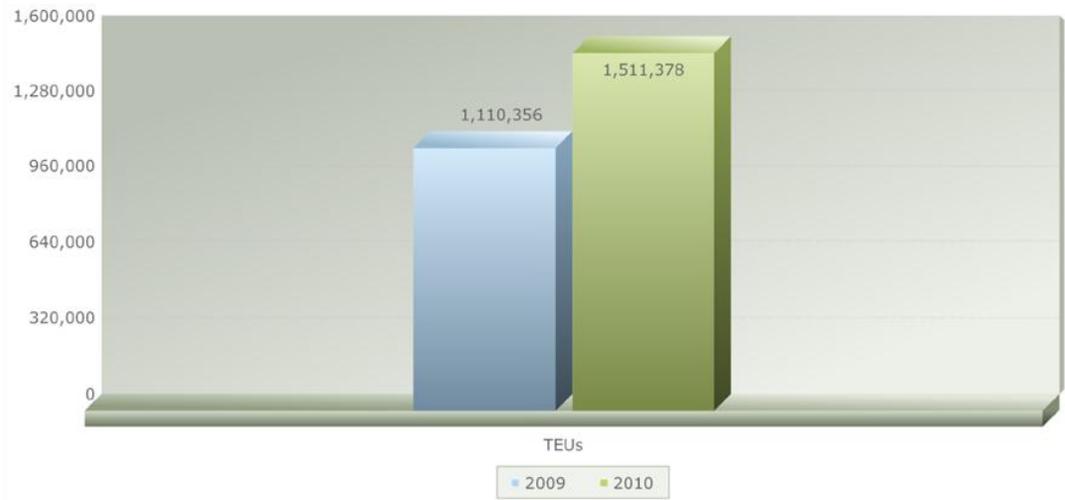


**Figura 4.17** Origen de las Importaciones en el Puerto de Manzanillo  
Fuente: Administración Portuaria Integral de Manzanillo

En la Figura 4.18 se muestra un incremento sustancial en el movimiento de contenedores, el cual se recuperó significativamente en el año 2010 después de la disminución en 2009; esto último puede observarse en la Figura 4.19.



**Figura 4.18** Movimiento de contenedores en Manzanillo. 1994-2009  
Fuente: Administración Portuaria Integral de Manzanillo



**Figura 4.19** Movimiento de contenedores en el puerto de Manzanillo en el año 2009 v 2010  
Fuente: Administración Portuaria Integral de Manzanillo

### **3.1.5. Búsqueda de Información sobre los puntos Fronterizos**

Los puntos fronterizos que se tomaron en cuenta por la zona son: Ciudad Juárez, Nuevo Laredo y Matamoros; de los cuales el más transitado es Nuevo Laredo.

#### **3.1.5.1. Zonas de Influencia**

Las zonas de influencia correspondientes a los puntos fronterizos son las siguientes.

##### ***Nuevo Laredo***

Es la principal entrada de mercancías hacia Estados Unidos provenientes de Asia y Europa. El tipo de carga es automotriz, industrial y para la industria maquiladora, la mayoría es manejada como importación o exportación definitiva. La infraestructura que posee le permite realizar operaciones de comercio exterior hacia y fuera del corredor industrial más importante del país, localizado desde el centro, el bajío y la parte noreste de México.

##### ***Ciudad Juárez***

Sus vías de comunicación transfronteriza hacen posible que diariamente decenas de vehículos particulares, personas, camiones de carga, contenedores de tren y aeroplanos crucen la frontera y se desplacen hacia las principales ciudades de Norteamérica, de manera ágil y segura a precios competitivos.

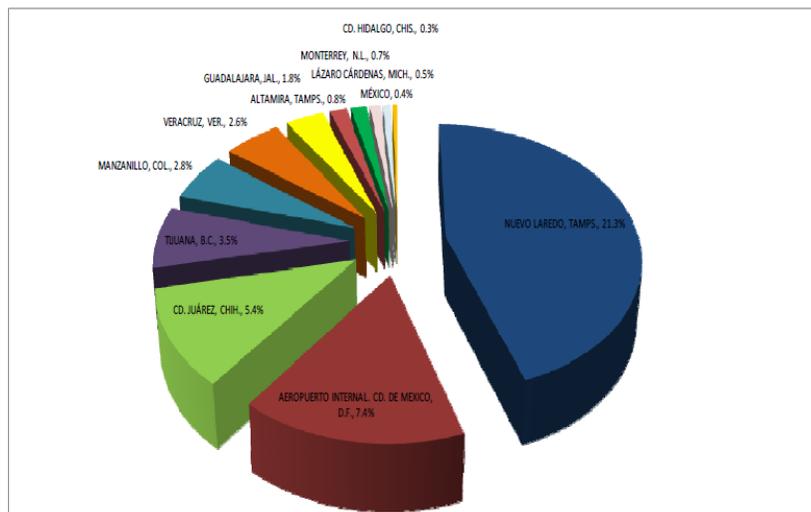
Tal como se observa en la Tabla 2.1 los principales puntos fronterizos en cuanto a contenedores que transitan en ferrocarril son Nuevo Laredo, Ciudad Juárez y Matamoros.

**Tabla 4.1** Movimiento de contenedores por autotransporte y ferrocarril en la frontera Norte de México 2006 (cajas)

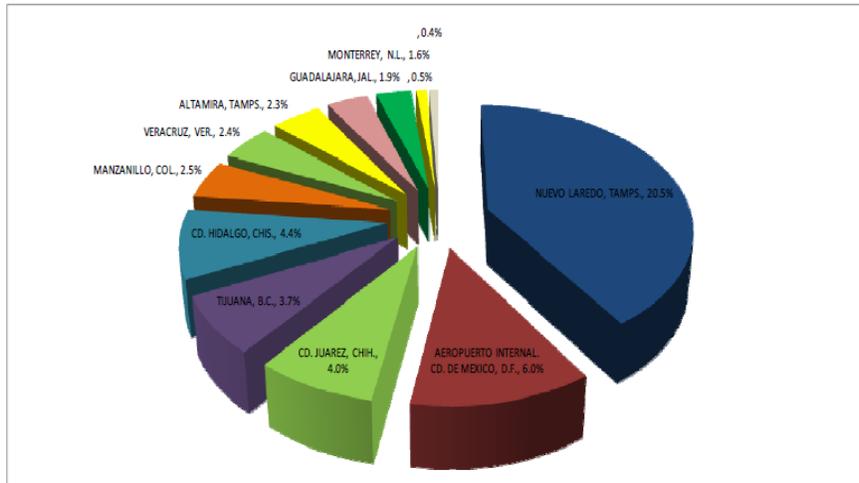
Puerto Fronterizo	Autotransporte Contenedores (miles)	Ferrocarril Contenedores (miles)	%Ferrocarril
Total General	4,513	675	15%
Nuevo Laredo	1,387	317	23%
Tijuana	726	-	-
Ciudad Juárez	717	111	15%
Reynosa	453	-	-
Mexicali	337	-	-
Nogales	248	47	19%
Matamoros	229	98	43%
Piedras Negras	100	87	87%
Otros	312	15	4%

Fuente: El presente y futuro del transporte intermodal. Lic. Eduardo Asperó Zanella. Sept (2007)

En la Figura 4.20 y en la Figura 4.21 se puede distinguir que la aduana de Nuevo Laredo es líder en el intercambio comercial entre México y Estados Unidos. De igual forma la de Ciudad Juaréz es la segunda si no se toma en cuenta la carga que ingresa al país por vía aérea, modo que no está considerado en el modelo debido a la utilización de contenedores como unidad para transportar los productos.



**Figura 4.20** Participación de las aduanas en las importaciones



**Figura 4.21** Participación de las aduanas en las exportaciones

### 3.1.6. Búsqueda de los principales corredores intermodales

A continuación en la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** se resentan los corredores intermodales utilizados en el año 2006, y en la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** los esperados para 2012. Como puede verse el principal cambio es la inclusión de las vías al noroeste del país utilizando Ciudad Juárez como cruce. Además también una ruta nueva desde el puerto de Topolobampo a Ojinaga, Chihuahua impulsando el tráfico de productos al centro y este de Estados Unidos, proveniente de Asia.

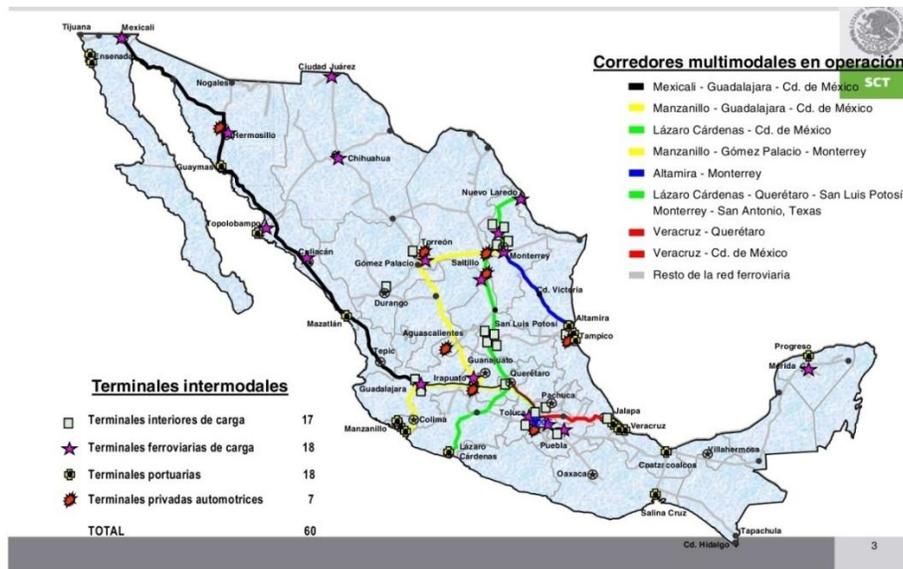


Figura 4.22 Corredores intermodales de 2006

Fuente: SCT

Otro de los corredores que se implementa en la **¡Error! La autoreferencia al arcador no es válida.** es el cruce desde el puerto de Manzanillo al de Altamira, así como el que une al puerto de Lázaro Cárdenas con el de Veracruz. Lo que permite la unión entre los principales puertos del Golfo y del Pacífico.

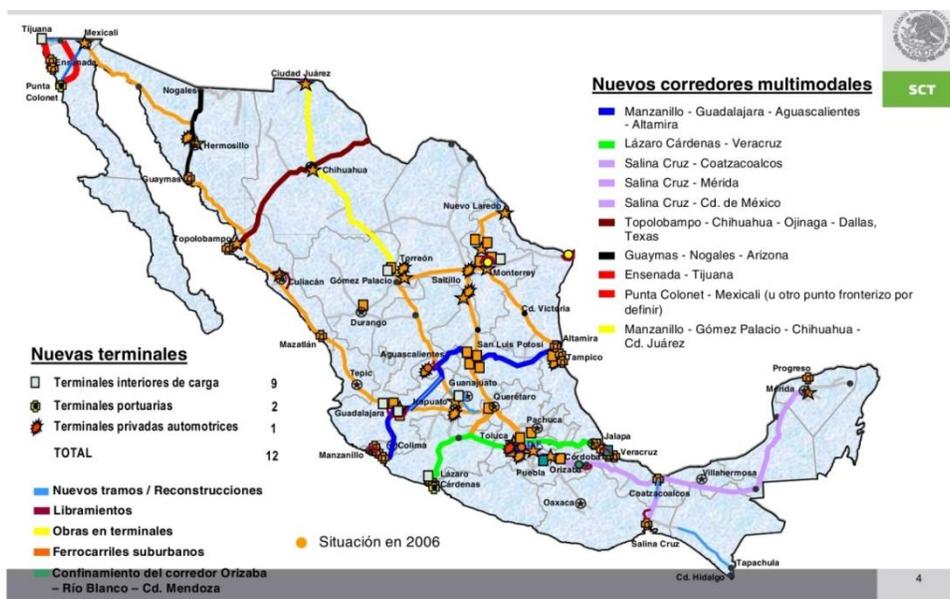


Figura 4.23 Corredores intermodales para el 2012

Fuente: SCT

### **3.1.7. Búsqueda de Información sobre las principales terminales intermodales**

Las terminales Intermodales consideradas en el modelo son las de Pantaco, Querétaro, Guanajuato, Monterrey y Gómez Palacio; éste último debido a su conexión por ferrocarril con Monterrey.

Un puerto seco es una terminal intermodal interior, conectada con una o varias terminales marítimas, con la capacidad de posponer el control aduanero a la entrada en el puerto seco.

Esta característica permite agilizar la salida de las mercancías de los puertos hacia su destino, contribuyendo a descongestionar sus operaciones.

#### **3.1.7.1. Funciones De Un Puerto Seco**

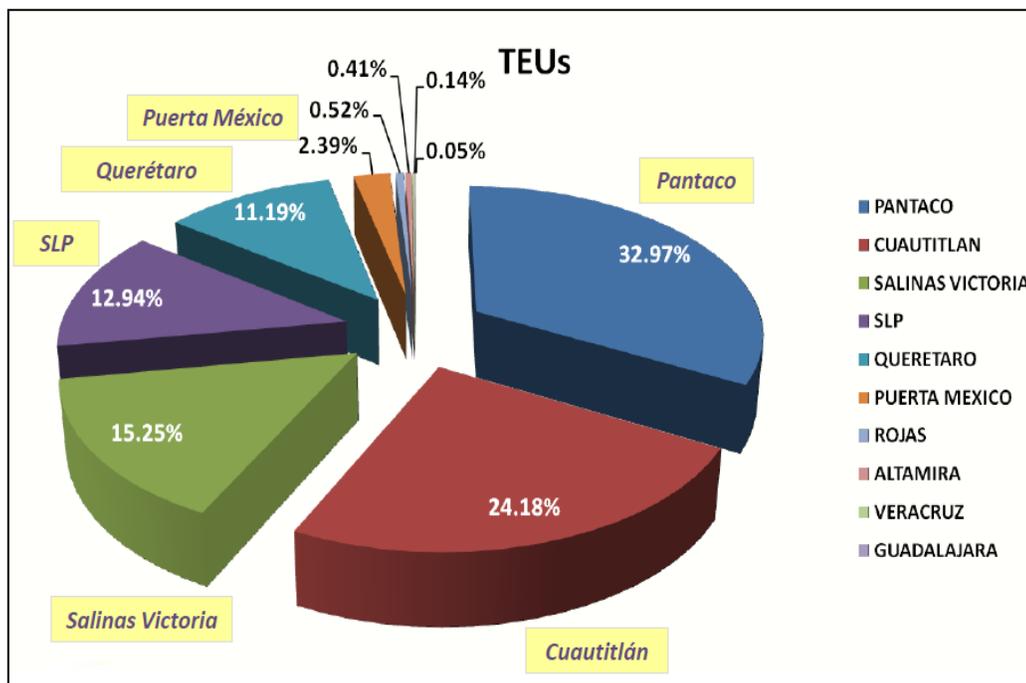
- Agilizar la salida de las mercancías de los puertos hacia su destino.
- Posponer el control aduanero.
- Recepción y expedición de trenes.
- Carga y descarga de contenedores.
- Almacenamiento, trasbordo, manipulación y acarreo de contenedores.

#### **3.1.7.2. Infraestructura Y Equipo**

- Carreteras eficientes.
- Conectividad ferroviaria.
- Instalación ferroviaria dentro de la terminal.
- Equipo especializado para maniobras de carga y descarga.

- Bodegas fiscalizadas para el almacenamiento de mercancías de comercio exterior.
- Patio para el almacenamiento y el manejo de contenedores.
- Recinto fiscalizado para el manejo de carga de comercio exterior.
- Área de consolidación y desconsolidación de mercancías.
- Instalaciones para el despacho aduanero

La Figura 4.24 permite identificar que las principales terminales intermodales operan en el centro del país como son Pantaco y Cuautitlán, siendo más importante la primera.



**Figura 4.24** Participación de los corredores y puertos secos en el 2009

### 3.1.7.3. Zona de Influencia

La zona de influencia de las principales terminales intermodales se menciona a continuación:

### **Pantaco**

D.F., Querétaro, Toluca, Puebla, San Luis Potosí, Guanajuato, Zacatecas y Edo. De México.

### **Guanajuato**

Aguascalientes, Guadalajara, Manzanillo, Lázaro Cárdenas, Tampico, Morelia, Querétaro, León, San Luis Potosí, Cd de México.

### **Querétaro**

Guanajuato, Querétaro, San Luis Potosí, Aguascalientes y D.F.

#### **3.1.7.4. Información General**

En las siguientes tablas se recaba información correspondiente a las principales terminales intermodales.

**Tabla 4.2** Información general de la terminal intermodal de Pantaco

Nombre de la empresa.	Terminal intermodal de Pantaco.
<b>Dirección</b>	Av. Rabaul s/n Esq. Nueces Estación de F.F.C.C Puerta 5 y 6 Col. Jardín Azpeitia
Información general.	
Tipo de contenedores.	Marítimos - Domésticos - Internacionales
Capacidad de vía	Capacidad para colocar 18 plataformas de 5 módulos
Capacidad de almacenaje.	1500 TEUS triple estiba 150 contenedores sobre chasis
Servicios en la terminal intermodal	Coordinación Logística - Arrastres a andenes - Fletes de autotransporte
Área de La terminal	Oficina Administrativa y de Operaciones de 20 metros cuadrados

	<b>Tipo</b>	<b>Descripción.</b>
Equipo para el manejo de la operación.	Tractores de patio	Tipo Hostler
	Chasis portacondenores	Para contenedores de 20' a 53'

**Tabla 4.3** Información general de la terminal intermodal de Guanajuato

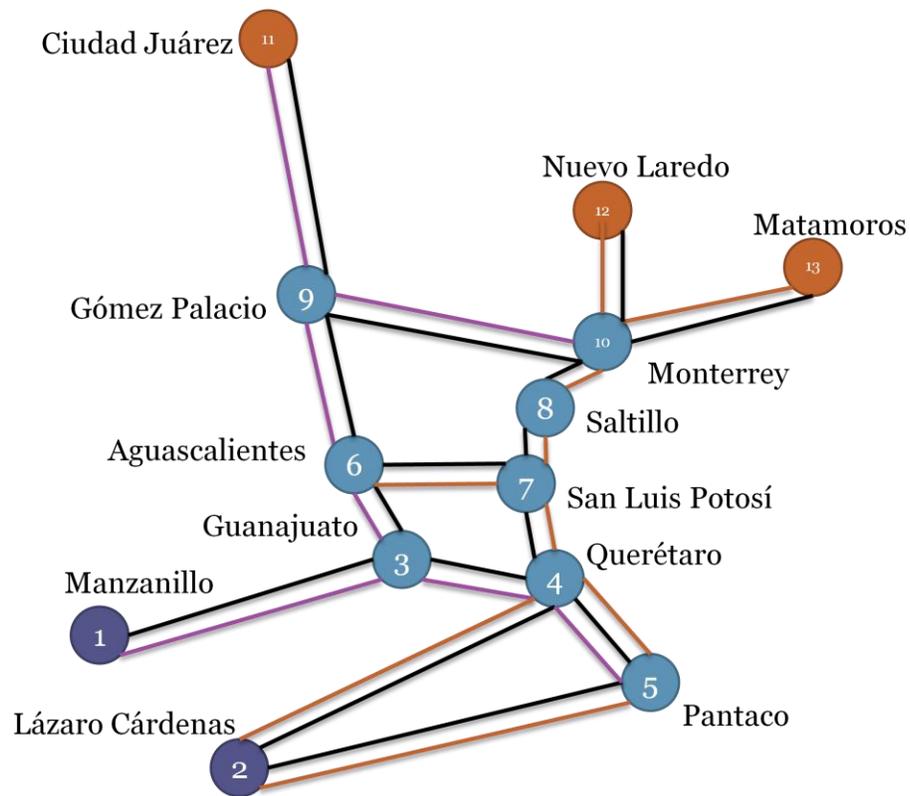
Nombre de la empresa.	Terminal intermodal de Guanajuato.		
<b>Dirección</b>	Vía de Ferrocarril Tramo México - Cd. Juárez Km. 391 Col. Puerto Interior. México.		
Información general.			
Tipo de contenedores.	<b>Marítimos</b> - <b>Domésticos</b> - <b>Internacionales</b>		
Capacidad de vía	Capacidad para colocar 8 plataformas de 5 módulos.		
Capacidad de almacenaje.	1800	TEUS	triple estiba 70 sobre chasis
Servicios en la terminal intermodal	Maniobras de carga y descarga a / desde tren - Maniobras de carga y descarga a / desde autotransporte - Almacenamiento de contenedores llenos y vacíos - Recinto Fiscalizado - Reparación y limpieza de contenedores - Integración de servicios ferroviarios - Servicios de apoyo e integración logística - Servicios de cruce de andén		
Equipo para el manejo de la operación.	<b>Tipo</b>	<b>Descripción.</b>	
	Grúa top loader.	Capacidad de 90,000 lbs, estiba	

		4 contenedores.
	Tractor de patio	Tipo Hostler
	Chasises Portacontenedores	Para contenedores de 20' a 53'

#### **4.1.8. Elaboración de la red de transporte a utilizar**

Para analizar la red de transporte se tomaron en consideración los datos sobre los principales puertos, los corredores y las principales terminales intermodales, así como de los puntos fronterizos de mayor tránsito.

En un inicio se planteó utilizar la red mostrada en la Figura 4.25, pero se encontró que algunas de las ciudades como San Luis Potosí o Saltillo, no tenían gran relevancia en la ruta propuesta, por lo que se decidió quitarlos; del mismo modo sucedió con Aguascalientes. De esta manera únicamente se mantuvieron los puntos principales para realizar los cambios de modo.



**Figura 4.25** Red de transporte, primera propuesta

#### 4.1.9. Ajuste de la red

Una vez que se identificaron los puntos que no eran relevantes para el modelo en particular, fue organizada la información sobre distancias entre los puntos por los diferentes modos de transporte, para que posteriormente se procediera al planteamiento matemático.

Como se puede observar en la Figura 4.26 la red constituye el recorrido desde los puertos del Pacífico hasta la frontera Noreste con Estados Unidos, de esta manera pueden atenderse las demandas ocasionadas por el congestionamiento de los puertos del Oeste de EE. UU. Además se toma en cuenta que gran cantidad de carga pasa por el centro del país, por lo que fue necesario agregar a Pantaco como un nodo más de la red.

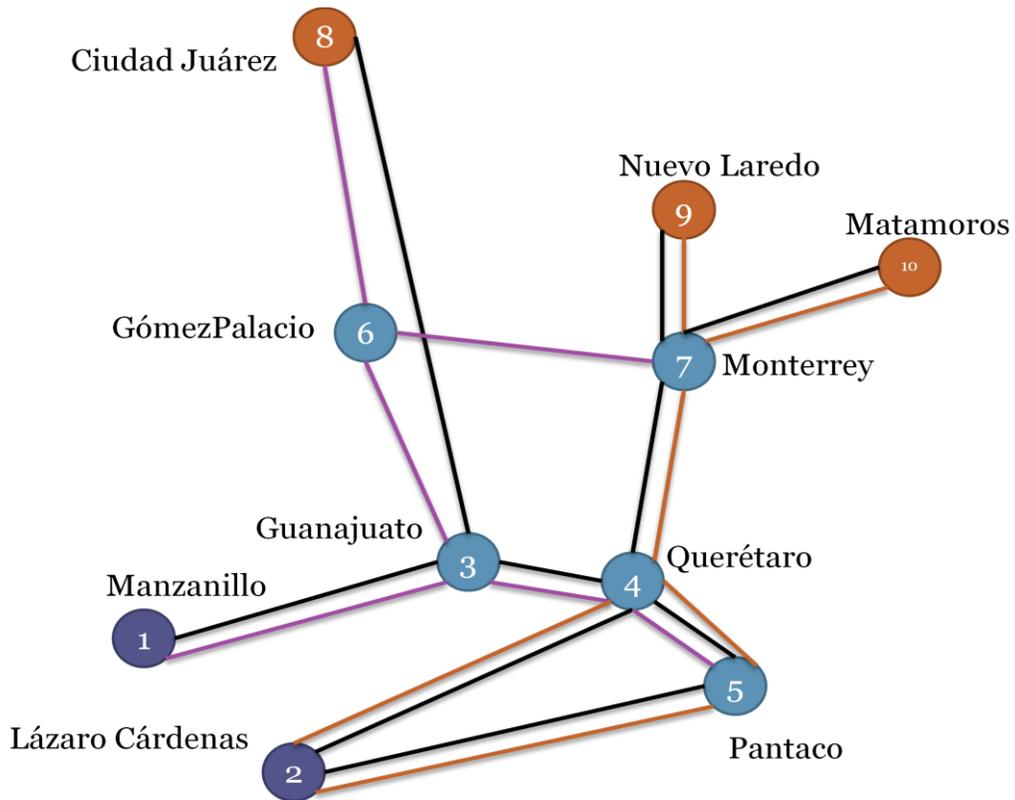


Figura 4.26 Red de Transporte utilizada en el problema

## 4.2. Modelado del problema

El modelo matemático en el cual fue basado el problema se muestra a continuación:

Donde  $c_{ij}$  corresponde a los costos para cada modo  $ij$  y  $q_{ij}$  la cantidad de producto a enviar por cada modo. La cantidad de recursos a satisfacer están

marcados por . Finalmente el conjunto de nodos está determinado por y el los conjuntos de arcos por donde corresponde a los diferentes modos {autotransporte, Ferromex, KCSM}.

Debido a que los recursos se encuentran definidos como negativos, positivos y nulos; los primeros indican a los Puertos Marítimos, los segundos hacen referencia a los cruces fronterizos y finalmente los últimos consideran a los Puertos Secos (terminales intermodales) que sirven como estaciones de transferencia de modo por lo que no alteran el flujo de la red.

De acuerdo con la red el modelo cuenta con diez nodos de los cuales, los dos primeros son nodos de oferta y corresponden a los puertos marítimos; los cinco nodos siguientes son nodos de transbordo y corresponden a las terminales intermodales, y los nodos restantes son de demanda y corresponden a los puntos fronterizos:

1. Manzanillo
2. Lázaro Cárdenas
3. Guanajuato
4. Querétaro
5. Pantaco
6. Gómez Palacio
7. Monterrey
8. Ciudad Juárez
9. Nuevo Laredo
10. Matamoros

A partir de estos nodos se establecieron los arcos correspondientes a cada modo los cuales son los siguientes (algunos arcos están repetidos por ser en ambos sentidos).

### Modo 1. Autotransporte (carretero)

Incluye los arcos:

- manz-gto
- lazc-pant
- lazc-qro
- qro-pant
- pant-qro
- qro-gto
- gto-qro
- gto-cdj
- qro-mty
- mty-nlar
- mty-mat

### Modo 2. Ferromex (ferroviario)

Incluye los arcos:

- manz-gto
- qro-pant
- pant-qro
- qro-gto
- gto-qro
- gto-gmzp
- gmzp-cdj
- gmzp-mt

### Modo 3. Kansas City Southern México (ferroviario)

Incluye los arcos:

- lazc-pant
- lazc-qro
- qro-pant
- pant-qro
- qro-mty
- mty-nlar
- mty-mat

Además se tomó en cuenta la distancia correspondiente a cada arco la cual multiplicada por el parámetro de costo por unidad por kilómetro para cada modo, sirve como referencia para tomar la decisión de utilizar o no el arco.

Las restricciones corresponden a cumplir con que la oferta no se supere y la demanda sea mayor o igual a la indicada.

### 4.2.1. Aplicación del Programa Gams

La formulación completa para este programa se muestra en el Anexo 1, a continuación se presenta una explicación detallada del mismo.

En la Figura 4.27 se ilustra el modo en el cual se introducen los conjuntos del problema en este caso se coloca el símbolo para identificar al conjunto en el primer caso 'i'; después se agrega el nombre del conjunto y finalmente entre diagonales y separados por comas se introducen los componentes del conjunto.

```
10  Sets
11  i  nodos      / manz, lazc, pant, gto, qro, gmzp, mty, cdj, nlar, ma»
   t /
12  j  autot     / manz-gto, lazc-pant, lazc-qro, qro-pant, pant-qro, q»
   ro-gto, gto-qro, gto-cdj, qro-mty, mty-nlar, mty-mat /
13  k  fxe      / manz-gto, qro-pant, pant-qro, qro-gto, gto-qro, gto-»
   gmzp, gmzp-cdj, gmzp-mty /
14  l  fkcs     / lazc-pant, lazc-qro, qro-pant, pant-qro, qro-mty, mt»
   y-nlar, mty-mat /;
```

Figura 4.27 Descripción de Conjuntos

En la Figura 4.28 se hace referencia a los parámetros del problema, primero colocando la palabra 'Parameters' y después la letra que identifica al conjunto de parámetros en este caso la letra 'a' seguido del conjunto al cual está referido que es el 'i' y después del nombre del parámetro. Posteriormente entre diagonales se incluye en forma de tabla el grupo de datos que corresponden al conjunto que se hizo referencia (en este caso los nodos) y frente a estos el valor del parámetro a considerar.

Los parámetros que incluyen signos negativos son correspondientes a las ofertas de los puertos de Manzanillo y Lázaro Cárdenas, las cuales fluyen en sentido negativo al ser de esos puntos donde inicia el recorrido del producto. Por el contrario las cantidades que carecen de signo y por lo tanto son positivas corresponden a los puntos de demanda, en este caso los puntos de la frontera Norte de México. Finalmente los nodos a los que corresponde un número zero (0) hacen referencia a

los nodos de transbordo, es decir aquellos por los cuáles transita el producto pero la cantidad de flujo no se pierde, y por ello es la misma cantidad la que entra al nodo que la que sale.

16	<b>Parameters</b>		
17			
18	a(i)	recursos	
19	/	manz	-600
20		lazc	-800
21		pant	0
22		gto	0
23		gro	0
24		gmzp	0
25		mty	0
26		cdj	400
27		nlar	700
28		mat	300 /

**Figura 4.28** Parámetros correspondientes a la oferta y demanda

En la Figura 4.29 se muestra la misma estructura que para el parámetro de los recursos con la diferencia que todas las cantidades son positivas y hacen referencia a la distancia de cada arco o entre dos nodos, lo cual es lo mismo. En este problema son estos datos combinados con el costo por unidad por kilómetro los que funcionan como factor de decisión para tomar o no un arco en particular. Del mismo modo que en la figura de ejemplo fueron realizadas tablas también para el modo de ferrocarril de ferromex y otro de ferrocarril de KCSM.

31	d1(j)	distancia	autotransporte
32	/	manz-gto	560
33		lazc-pant	658
34		lazc-gro	561
35		gro-pant	191
36		pant-gro	191
37		gro-gto	197
38		gto-gro	197
39		gto-cdj	1470
40		gro-mty	766
41		mty-nlar	221
42		mty-mat	311 /

**Figura 4.29** Parámetro de distancia correspondiente al autotransporte

La matriz de incidencia mostrada en la Figura 4.30 corresponde al flujo de la red, es decir, los unos con signo positivo están relacionados con el nodo receptor de cada arco y los unos con signo negativo corresponden al nodo emisor.

```

86 Table m3(i,l) matriz de incidencia kcsm
87          lazc-pant lazc-qro qro-pant pant-qro qro-mty mty-nlar»
      mty-mat
88      lazc          -1          -1
89      pant          1              1          -1
90      qro              1          -1          1          -1
91      mty              -1              1          -1 »
      -1
92      nlar              -1              1
93      mat              -1              1          »
      1 ;

```

**Figura 4.30** Matriz de incidencia para el modo ferroviario de KCSM

El costo se declara como un escalar, a continuación se presenta el modo de hacerlo.

```

95 Scalar f1 carga en pesos por unidad por km autotransporte /14/ ;

```

**Figura 4.31** Escalar correspondiente al costo por unidad por km del modo 1

En la siguiente figura se muestra como se relacionan el escalar y la matriz de incidencia para obtener los costos para cada arco de cada modo.

```

99 Parameter c1(j) costo de autotransporte en miles de pesos por unidad ;
100
101          c1(j) = f1 * d1(j) / 1000 ;

```

**Figura 4.32** Parámetro de costo del modo 1

Después es necesario declarar las variables, como se puede ver en la Figura 4.33 se utiliza una para cada modo, y hace referencia a la cantidad de producto, es decir, la cantidad de contenedores enviada por cada arco de cada modo.

```

111 Variables
112      x1(j) cantidad transportada en unidades por autotransporte
113      x2(k) cantidad transportada en unidades en ferromex
114      x3(l) cantidad transportada en unidades en kcsm
115      z      costo total de transporte en miles de pesos ;

```

**Figura 4.33** Declaración de variables en Gams

Por el tipo de programación del problema y las propiedades del programa Gams, únicamente fue necesario redactar dos restricciones la primera se muestra a continuación y corresponde a la función objetivo:

```
123 cost .. z =e= sum(j, c1(j)*x1(j)) + sum(k, c2(k)*x2(k)) + sum(l, c»
3(l)*x3(l));
```

**Figura 4.34** Función objetivo

La función objetivo obtiene el costo total de la solución, al multiplicar los costos por los arcos utilizados en cada modo.

La otra restricción hace referencia a la conservación de flujo dentro de la red, con lo cual se cumplen los valores del parámetro ‘recursos’, que son los que determinan la cantidad de contenedores entregados en cada nodo. Con esta restricción se asegura que la cantidad total de producto que abandona los nodos de oferta es igual a la cantidad total de producto que se entrega en los nodos demanda, y por lo tanto los nodos de transbordo únicamente funcionan como tal, y no almacenan alguna cantidad de producto.

En la Figura 4.35 se observa al final del renglón que la suma de la cantidad de producto enviada por cada arco debe ser mayor (=g=) a los recursos con los que se cuentan.

```
125 restric(i) .. sum(j, m1(i,j)*x1(j)) + sum(k, m2(i,k)*x2(k)) + sum(l, m3(i»
,l)*x3(l))=g= a(i) ;
```

**Figura 4.35** Restricción de conservación de flujo

Ya que los nodos de oferta tienen valores negativos, y la restricción exige que la suma sea mayor, nunca se sobrepasará la capacidad de los nodos oferta.

Finalmente se definió el nombre del modelo y se determina el solver a utilizar para resolver el problema.

```
127 Model transport /all/ ;  
128  
129 Solve transport using lp minimizing z ;  
130  
131 Display X1.L, X2.L, X3.L, Z.L;
```

**Figura 4.36** Estructura para la solución del problema

De acuerdo con el modelo aplicado se obtuvieron resultados favorables en cuanto a su funcionamiento, ya que reacciona ante los cambios en los costos o distancias y cumple correctamente la distribución respetando las restricciones.

#### 4.2.2. Aplicación del Programa Aimms

La hoja de datos obtenida en este programa se muestra en el Anexo 2, a continuación se describe el modo de utilizar dicha hoja.

El modelo fue cargado en este programa con la finalidad de obtener resultados gráficos y prácticos sobre el planteamiento, ya que da la opción de modificar en un entorno gráfico los datos de entrada y salida una vez que se introdujeron previamente, lo que otorga facilidad para manipular la información y analizar los resultados.

Para modificar los datos de entrada del problema en Aimms una vez que se introdujo en el programa, se realizan las modificaciones mostradas en la Figura 4.37 correspondiente a los costos por unidad por kilómetro y en la Figura 4.38 que indica la cantidad disponible en cada Puerto y la necesaria en cada Cruce.

f1	14.0
f2	12.0
f3	11.0

**Figura 4.37** Costos para cada modo de transporte

	recursos
manz	-600
lazc	-800
pant	
gto	
qro	
gmzp	
mty	
cdj	400
nlar	700
mat	300

**Figura 4.38** Recursos utilizados en cada nodo

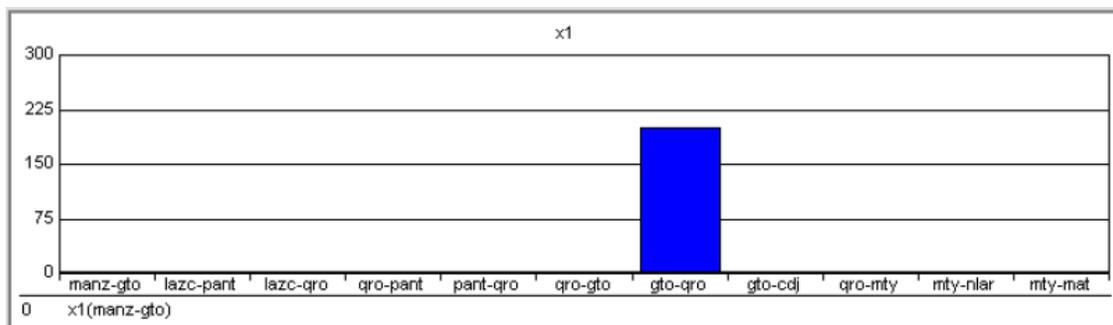
Después de modificar las tablas de datos de entrada se actualiza la hoja dando clic en el botón Resolver con lo cual se modificarán los resultados que se muestran en la Figura 4.39.

En dicha figura se muestra el resultado del problema; las columnas corresponden a cada modo (autotransporte, Ferromex, KCSM), y las filas contienen información sobre los arcos; por lo que como resultado se obtienen las cantidades a enviar según corresponda.

	x1	x2	x3
manz-gto	200		
lazc-pant			
lazc-qro			
qro-pant			
pant-qro			
qro-gto			
gto-qro			
gto-cdj			
qro-mty			
mty-nlar			
mty-mat			
manz-gto		600	
qro-pant			
pant-qro			
qro-gto			
gto-qro			
gto-gmzp		400	
gmzp-cdj			400
gmz-mty			
lazc-pant			800
lazc-qro			
qro-pant			
pant-qro			
qro-mty			1000
mty-nlar			700
mty-mat			300

**Figura 4.39** Cantidad de contenedores a enviar por cada arco en cada modo

Por último en la Figura 4.40 las cantidades se ven reflejadas en las gráficas por cada arco y cada modo.



**Figura 4.40** Gráfica correspondiente a los arcos del modo 1

### 4.2.3. Análisis del Algoritmo de Recocido

A continuación se detalla una explicación del algoritmo utilizado, el cual considera al algoritmo estándar de recocido simulado. La descripción hace referencia al funcionamiento del algoritmo paso a paso.

**Tabla 4.4** Descripción del proceso de Recocido Simulado

Pseudocódigo	Descripción
Begin	Inicio
$x = \text{selecc}(X)$	Se selecciona la solución inicial
<i>elegir</i> $T_0$	Se determina el valor de la temperatura inicial
$T = T_0$	Se hace temperatura actual igual a temperatura inicial.
Repeat	Deben repetirse los pasos siguientes.
For ( <i>contador</i> = 0) to L do	Se integra un contador para determinar el número de ciclos.
<i>elegir</i> $j \in N(i)$	Se elige una solución nueva para compararla con la solución inicial.
$\delta = E(j) - E(i)$	La diferencia entre la solución nueva y la solución inicial. Si la diferencia es mayor que cero la solución nueva se convierte en la solución actual.
If (( $\delta < 0$ ) OR ( <i>aleatorio</i> [0,1] < $\exp(-\delta/T)$ ))	Si la diferencia de energía es menor que cero y el valor aleatorio entre 0 y 1 es menor que el valor dado por la función de probabilidad, entonces se acepta la solución, aunque no haya sido mejor; con la finalidad de escapar de mínimos locales.
then	

<b><i>i=j</i></b>	La solución nueva se convierte en la solución actual.
<i>Endif</i>	
<i>Endfor</i>	
<b><i>reducir (T)</i></b>	Se reduce la temperatura, es decir, al ser más bajo el valor para aceptar o rechazar una mala solución, solo se elegirán las soluciones buenas.
<i>until (cond. termina)</i>	Hasta que el ciclo termina.
<b><i>return (i)</i></b>	Devuelve la solución actual.
<i>End</i>	

#### 4.2.4. Aplicación de Matlab

Una vez que se analizó el proceso del recocido simulado, se prosiguió a incluirlo en el programa Matlab para lo cual se utilizó el siguiente procedimiento. En el Anexo 3 se muestra el código completo.

En la siguiente figura se muestra la fijación de valores iniciales del problema, primero para probar el algoritmo se determinó utilizar únicamente 10 iteraciones por ciclo de temperatura, y que ésta disminuyera un 20% en cada ciclo, con valores que se ubican en el intervalo entre 100 y 30. De este modo antes de que el proceso se ubique en el menor valor de la temperatura, se habrían realizado 6 ciclos de 10 iteraciones cada uno.

```

%recocido simulado aplicado al problema del transporte

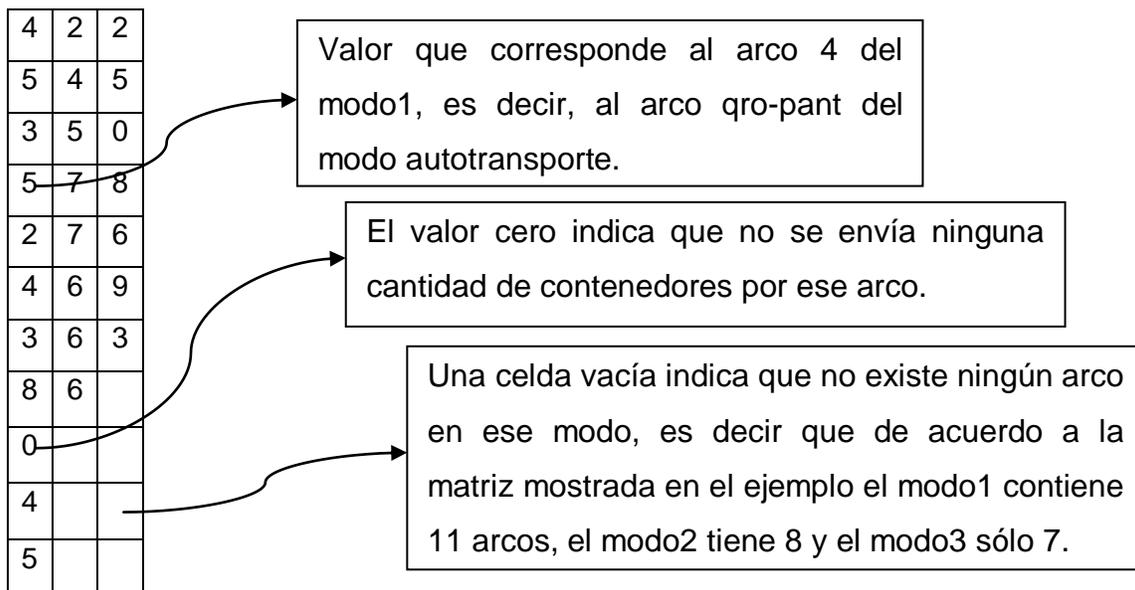
tem_ini =100;
tem_fin = 30;
max_iter_ini = 10;
alpha = 0.8;

%solucion inicial se genera vector con ceros y unos
inicial=zeros(11,3);
i=11;
j=3;
sol_ini =inicio (inicial,i,j);

```

**Figura 4.41** Declaración de valores iniciales para el proceso de recocido

Como muestra la Figura 4.42, las soluciones posibles para el problema están dadas por una matriz en la que las columnas corresponden a los modos de transporte y las filas a los arcos de cada modo.



**Figura 4.42** Ejemplo de solución inicial

La solución se encontrará asignando valores a cada espacio de la matriz, de manera que al multiplicar por los parámetros del problema el resultado se aproxime a la solución óptima.

Inicialmente se había decidido utilizar valores de cero en toda la tabla para la solución inicial, pero al crearse una nueva solución, también resultaba con esos valores, por lo que se decidió integrar una solución inicial diferente.

Para obtener el valor del costo de la solución inicial se utiliza la función de evaluación la cual es formulada como se muestra en la figura Figura 4.43, el procedimiento se mostrará en el apartado 4.2.5 de este documento. Este valor servirá para evaluar si la solución encontrada es mejor o peor. En un principio determina el valor de la solución inicial pero posteriormente también se utiliza para encontrar los valores de las soluciones nuevas. Mientras más se acerque a cero este valor significa que la solución evaluada está más cerca de la óptima.

```
costo_ini= -1 * costoruta_t (sol_ini,i,j); %medir la calidad de la solucion inicial
```

**Figura 4.43** Determinación del costo inicial

En la Figura 4.44 se muestra el cuerpo del proceso de recocido simulado y se describe de la siguiente manera.

El comando while controla los ciclos que se realizarán en base al valor de la temperatura, el cual está determinado por el intervalo definido inicialmente, al igual que la disminución de este valor de acuerdo con alpha.

Dentro de los ciclos de temperatura, se realiza otro ciclo que corresponde al número de iteraciones. Durante estas iteraciones se pretende buscar nuevas soluciones que puedan ser evaluadas para determinar si son mejores que la solución actual.

Como se muestra en la Figura 4.44 antes de efectuar la función de evaluación se lleva a cabo la función de perturbación la cual se describirá en el apartado 4.2.6 de este documento, y cuyo objetivo es el de generar una nueva solución a partir de la actual, realizando modificaciones a los valores que contiene dicha solución.

Posteriormente se lleva a cabo la evaluación de la solución y se determina la diferencia que existe entre el costo de la solución nueva y el costo de la solución actual. Si el valor resultante es mayor que cero significa que la solución nueva es mejor que la solución actual y por lo tanto los valores nuevos pasan a ser los valores actuales de la solución. Posteriormente se evalúa si el costo nuevo es menor que el mejor costo; en el código se utiliza signo '>' porque los costos están dados en números negativos. Si resulta ser menor entonces los valores de la solución nueva pasan a ser los mejores.

Si por el contrario, la diferencia entre solución nueva y solución actual es menor que cero, entonces se determinará aceptar o no la solución de acuerdo con una función de probabilidad.

```

while temp > tem_fin
    prom_cost_act = 0;
    for iter = 1:max_iter;
        sol_new =perturbacion_t(sol_act,i,j);

        cost_new = -1* costoruta_t(sol_new,i,j);
        E= cost_new - cost_act;

        if E>0
            sol_act =sol_new;
            cost_act = cost_new;
            if cost_new> best_cost
                best_sol = sol_new;
                best_cost = cost_new;
                best_temp =temp;
            end
        else
            aleatorio = rand;
            valor = exp(E/temp);
            if aleatorio < valor
                sol_act = sol_new;
                cost_act=cost_new;
            end
        end
        prom_cost_act = prom_cost_act + cost_act;
    end
end

```

**Figura 4.44** Código de recocido simulado en Matlab

El valor arrojado por la función de probabilidad de la Figura 4.45. depende de la temperatura del ciclo y ya que es una función exponencial y que el valor de E en este punto es negativo los valores se encontrarán entre 0 y 1. Cuando la temperatura sea más alta al inicio del proceso la relación con el valor E será menor y por lo tanto el valor de probabilidad será más cercano a 1, por lo que el número aleatorio de una distribución uniforme tendrá más probabilidad de ser menor que el valor de la distribución.

Por el contrario si la temperatura es más baja, al final del proceso, la relación con el valor E será mayor y por lo tanto el valor de probabilidad será más cercano a 0 y el número aleatorio tendrá menos probabilidad de ser menor al valor de la distribución.

```
valor = exp(E/temp);
```

**Figura 4.45** Función de probabilidad de aceptación

Por lo tanto, cuando la temperatura es alta, hay mayor probabilidad de elegir malas soluciones, para evitar los mínimos locales; pero conforme la temperatura disminuye lentamente, hay menor probabilidad de elegir malas soluciones que desvíen la búsqueda de la solución óptima.

Para finalizar el ciclo de temperatura se realiza el procedimiento mostrado en la Figura 4.46. Se guardan los datos correspondientes al promedio del costo actual a través de las iteraciones y posteriormente se utilizan para graficar los resultados obtenidos del algoritmo. Por último se disminuye la temperatura y se hace solución actual a la mejor solución obtenida del ciclo de iteraciones, después se inicia el siguiente ciclo de temperatura. Con esto termina el proceso de recocido simulado.

```
prom_cost_act = prom_cost_act/max_iter;  
grafico_best_cost (u) = best_cost;  
grafico_act_cost (u) = prom_cost_act;  
  
u= u+1;  
temp = temp*alpha;  
sol_act = best_sol;  
cost_act= best_cost;
```

**Figura 4.46** Registro de resultados

#### 4.2.5. Ajuste de la función de Evaluación

El código completo de la función se muestra en el Anexo 4, su funcionamiento es el siguiente:

Para determinar el costo total de la solución debe evaluarse cada modo por separado y al final se sumarán los costos individuales para obtener el costo total.

En la Figura 4.47 se realizan las operaciones para determinar el costo del modo1 multiplicando la cantidad de contenedores a enviar (ruta1) por cada arco del modo1 y realizando una suma acumulada de dichos costos. Finalmente se obtiene el costo total del modo1.

```
for u=1:j
c1(u)=f1*d1(u)/1000;
costo_r1 = costo_r1 + c1 (u) * ruta1 (u);
end
```

**Figura 4.47** Procedimiento para obtener el costo del modo1

Para determinar las cantidades que entran y salen de cada nodo se programó el código de la Figura 4.48 el cual contiene un ciclo para indicar el número de nodo al que se hace referencia y posteriormente otro ciclo para la suma de cantidades enviadas por cada modo en cada nodo de la red.

```
for n=1:i
    for u=1:j
        sub1(u)= m1(n,u)*ruta1(u);
    end
    sub1t(n)=sum(sub1);
```

**Figura 4.48** Procedimiento para obtener el flujo

El flujo de producto en cada nodo debe cumplir con la restricción de ser menor a la cantidad de recursos disponibles o de lo contrario se agregará una penalización arbitraria al valor de la función objetivo, lo cual hará que la solución sea más lejana a la óptima y por lo tanto menos propensa a elegirse.

En un inicio también se pretendía agregar una penalización al cambiar de modo de transporte, pero al final no se logró ajustar al problema. El código de este procedimiento está incluido en el Anexo 4.

```
if recursos(n)>=a(n)
    pen(n)=0;
else
    pen(n)=1000; %penalizacion por cada restriccion que no se cumpla
end
```

**Figura 4.49** Evaluación de recursos disponibles

Para finalizar la función se suman los costos individuales de cada modo y se le agregan las penalizaciones correspondientes, el valor resultante será considerado como costo de la función.

#### **4.2.6. Ajuste de la función perturbación**

Inicialmente la función perturbación separaba los valores de la solución en cadenas que representaban un modo de transporte. Después se obtenía la media y la desviación estándar de esa cadena de valores. Para determinar qué valor de la cadena debería ser modificado, se elegía un número de acuerdo con una distribución uniforme que determine la fila (arco de la red); si el valor de la celda resultaba cero, se elegía otra fila; hasta obtener un valor diferente de cero. Una vez realizada la selección se agregaba o quitaba una cantidad de acuerdo con una distribución normal con media y desviación estándar de los datos iniciales de la cadena. El código de este procedimiento se encuentra en el Anexo 5.

Debido a que no se obtuvieron buenos resultados de esta función hubo que realizar modificaciones en el proceso para obtener nuevas soluciones, las cuales se presentan en el apartado 4.2.8 de este documento.

#### **4.2.7. Modelado de una instancia de menor tamaño**

A raíz de que la función de perturbación no arrojó los resultados esperados y que el problema contenía demasiados datos, fue necesario trabajar con una instancia del problema de menor tamaño utilizando únicamente cinco nodos y cuatro arcos para cada modo.

Se tomó esta decisión porque el manejar una menor cantidad de datos y variables, sería más comprensible a simple vista; sobre todo para identificar el flujo de producto de un modo a otro, y para que los cambios realizados a la solución con la función perturbación, fueran fácilmente identificables para su evaluación.

De acuerdo con los cambios se realizaron las modificaciones a la función de perturbación y se observó su funcionamiento.

#### **4.2.8. Diferentes tipos de perturbación**

Se optó por realizar modificaciones a esta función debido a que al aplicarse los cambios a la solución, ésta cambia abruptamente y no sigue un patrón de comportamiento por lo que se puede estar cerca de la solución óptima y alejarse al modificar la solución; esto genera pérdida de tiempo y en problemas de mayor tamaño el algoritmo se demoraría mucho para ofrecer una buena solución como resultado.

El problema recae principalmente en la falta de conservación de flujo de la red, ya que se modifica toda la tabla de resultados sin tomar en cuenta de donde proviene el flujo de producto, por lo que los datos son incongruentes con la red y al ser evaluada la solución siempre se agregan penalizaciones por no conservar el flujo de la red.

Tomando en consideración los puntos explicados arriba y una vez que se tuvo una instancia de menor tamaño se aplicaron modificaciones a la función de perturbación del algoritmo, que a continuación se mencionan:

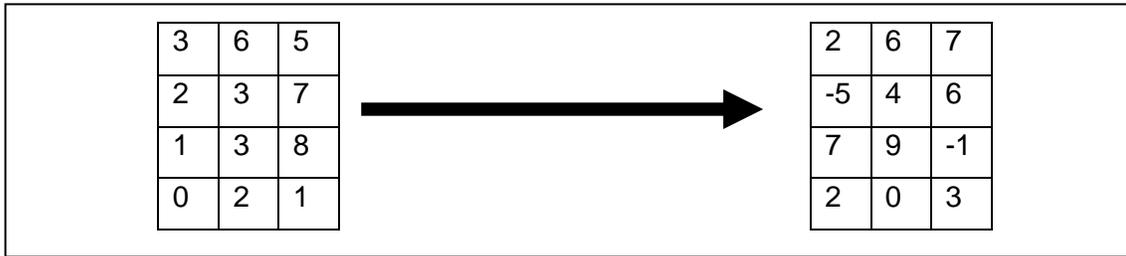
- Modificar todas las celdas con una distribución de probabilidad de normal.
- Modificar una línea con una distribución normal eligiendo una fila al azar.
- Modificar sólo las líneas que superen la distribución normal.

Para comprender mejor estos puntos se realizará una descripción de su aplicación en el problema.

#### **4.2.8.1. Modificar todas las celdas con una distribución de probabilidad de normal**

Para realizar la perturbación era necesario modificar todos los valores de la solución para obtener una nueva, pero en ocasiones los valores resultaban muy altos y no congruentes con los recursos por lo que era necesario agregar una penalización al costo total, y también se encontró el problema de obtener números negativos al agregar un valor negativo de la distribución normal; lo cual no es factible en éste problema.

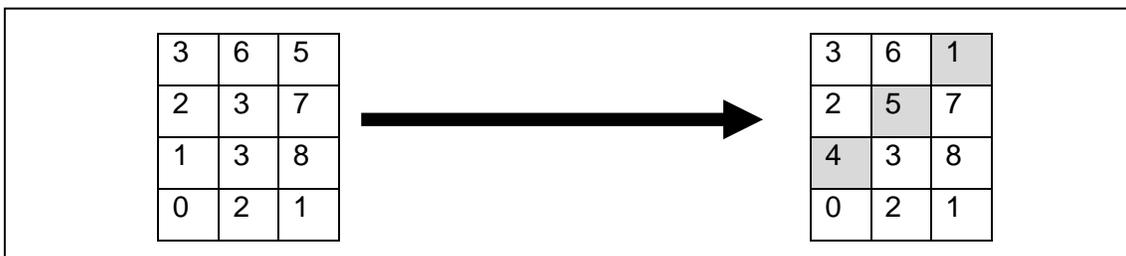
Al realizar este tipo de cambios a la solución no se obtuvieron mejores resultados en el algoritmo de búsqueda debido a que no se le daba seguimiento a los valores que disminuían los costos de la función total; y al realizar la perturbación se perdían nuevamente, por lo que el espacio de búsqueda no se vuelve más pequeño.



**Figura 4.50** Ejemplo de una perturbación realizada a la solución para el problema de transporte de menor tamaño

#### 4.2.8.2. Modificar una línea con una distribución normal eligiendo una fila al azar

Para mantener parte de la solución y verificar si se obtenían mejores resultados, se implementó otro tipo de perturbación, en la cual se modificaba únicamente una fila para cada modo, elegida aleatoriamente bajo una distribución uniforme. En este punto se agregó una restricción para que no sume números negativos que en su valor absoluto sean mayores a los valores que se tienen en la solución. También se tenían restricciones para sumar o restar únicamente números enteros para que haya factibilidad en los resultados.

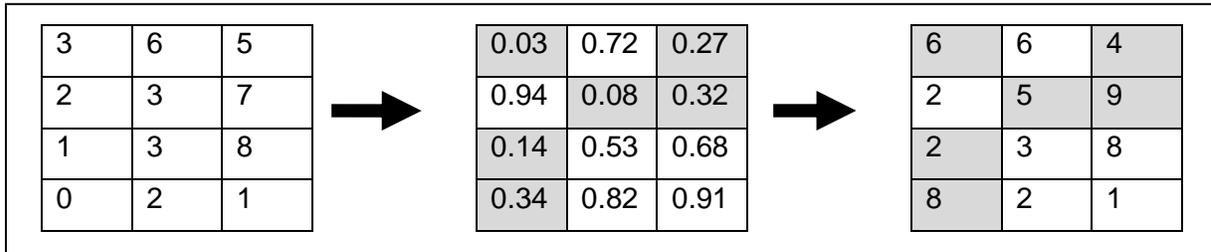


**Figura 4.51** Ejemplo de una perturbación modificando una línea por modo

Al realizar este tipo de cambios a la solución hubo mejoras en el tiempo para encontrar las soluciones cercanas a la óptima, pero no se consiguió que la búsqueda mejorara los resultados que evitan las penalizaciones, y si se lograba obtener alguno, era difícil que se mejorara al realizar los cambios.

#### 4.2.8.3. Modificar sólo las líneas que superen la distribución normal

Para realizar esta perturbación se creó otra matriz la cual incluye distribuciones de probabilidad aleatorias; con ellas se valida cuál de las celdas será modificada.



**Figura 4.52** Ejemplo de una perturbación utilizando una matriz aleatoria. Cambiar si  $P < 0.4$

Con este tipo de modificaciones se busca que a las soluciones que afecten el flujo de la red, se les asigne una menor probabilidad de permanecer en la solución y por lo tanto sea más fácil seleccionarlas para ser modificadas.

## Capítulo 5

# Conclusiones y Recomendaciones

## 5.1. Conclusiones

El modelo de transporte intermodal desarrollado representa la red de carreteras y vías que unen a los principales puertos del Pacífico y a la Frontera Noreste de México; de igual forma considera las distancias y los costos en unidad por kilómetro para los modos de transporte. La elección de uno de éstos, permite realizar las combinaciones de arcos de la red presentada en la Figura 3.26 necesarias para obtener mejores resultados a un menor costo total.

La solución del modelo mediante programación lineal en Gams presenta buenos resultados, demostrando que el problema es factible, sin embargo, al incrementar el número de variables se complica la obtención de resultados al someter el modelo, debido a la cantidad de datos necesarios para su solución, además de elevar la dificultad al programar el modelo.

El método de solución utilizando recocido simulado necesita un mayor tiempo para arrojar resultados debido a que la función perturbación requiere de ajustes que permitan delimitar el espacio de búsqueda para disminuir el tiempo de obtención de soluciones; al igual que por ser un algoritmo de exploración proporciona resultados aproximados, mientras que la programación lineal los presenta exactos y por lo tanto su calidad es mejor. De igual manera, el modelo aún es muy pequeño y considera pocos elementos del problema obteniendo una solución más rápida si se utiliza el método de programación lineal para resolverlo.

El transporte intermodal es una buena opción cuando los productos necesitan ser transportados a distancias muy largas o cuando las cantidades de producto que deben llegar a su destino son elevadas, lo que permite aprovechar los beneficios de los modos de transporte que admiten una mayor capacidad, como lo es el ferrocarril. Además se disminuye el impacto ecológico debido a que son menores los viajes que deben realizarse para llevar la cantidad total de producto a su destino.

Y finalmente en nuestro país es necesario que se legisle a favor del transporte intermodal, delimitando las responsabilidades a cada actor (empresas de transporte) de la cadena para obtener mejores resultados bajo un trabajo conjunto.

## **5.2. Recomendaciones**

El proyecto requiere ajustes que beneficien a la función de perturbación de manera que se respeten los flujos de la red; se cree que de esta manera se reduce el espacio de búsqueda de las posibles soluciones y por lo tanto resulta un algoritmo más rápido.

Para lograr esos ajustes es necesario modificar la manera en la que se elige una solución nueva, hasta ahora se han probado tres posibles procedimientos para modificar la solución cambiando la cantidad de producto que se transporta de un punto a otro según una distribución de probabilidad normal, para continuar con el ajuste de la función sería conveniente respetar los flujos de la red para realizar las modificaciones considerando las dependencias de los arcos y, de esta manera al modificar un valor no se pierda el equilibrio en las cantidades de producto transportadas en toda la red.

Por otro lado resultaría conveniente agregar una mayor cantidad de variables al problema las cuales permitirían hacerlo más cercano al modelo real. Entre las variables y parámetros que pueden agregarse se encuentran, la capacidad de los arcos y modos de transporte, las penalizaciones por retrasos en tiempo o por el incremento de costos al realizar cambios de modo, las penalizaciones por el incremento en las operaciones que se llevan a cabo en la terminal intermodal, los tiempos de recorrido según el modo de transporte, los costos por retrasos, entre otros; cabe mencionar que deberán evaluarse los beneficios que se obtendrían al incluir cada variable.

# Fuentes Consultadas

## Libros

1. ARAUJO, Lourdes, y Carlos Cervigón. *Algoritmos evolutivos: un enfoque práctico*. D.F.: Alfaomega, 2009.
2. ASPERÓ Zanella, Eduardo. «El Presente y Futuro del Transporte Intermodal.» Asociación Mexicana de Transporte Intermodal, Septiembre 2007.
3. BLOCH, Roberto D. *Transporte Multimodal*. Buenos Aires: AD-HOC, 1996.
4. BOWERSOX, Donald J., David J. Closs, y M. Bixby Cooper. *Supply Chain Logistics Management*. New York, NY.: McGraw-Hill, 2007.
5. BROOKSHEAR, J. Glenn. *Teoría de la Computación*. México: Pearson, 1999.
6. CABALLERO Caballero, Sergio Alex. *Desarrollo y aplicación de un algoritmo híbrido de cómputo evolutivo y recocido simulado para la solución de problemas de timetabling*. Atizapán de Zaragoza, Edo. Méx.: ITESM Cem, 2007.
7. KURI Morales, Ángel, y José Galaviz Casas. *Algoritmos Genéticos*. México: Sociedad Mexicana de Inteligencia Artificial, 2007.
8. MORA García, Luis Anibal. *Gestión Logística Integral*. Bogotá: Ecoe Ediciones, 2008.
9. PEDERSEN, Michael Berliner. *Optimization models and solution methods for intermodal transportation*. Denmark: Atkins Denmark, 2005.
10. RUIZ Olmedo, Sergio A. *Tratado Práctico de los Transportes en México*. México: 20+1, 2007.
11. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. «Manual Estadístico del Sector Transporte 2009.» Sanfandila, Qro., 2009.

## Documentos Electrónicos

12. CARIS, An, Cathy Macharis, y Gerrit K. Janssens.  
<http://www.informaworld.com/smpp/title~content=t713653693> (último acceso: 30 de Junio de 2010).
13. *Grupo Fidalex S.A. de C.V.* <http://cargainfo.com> (último acceso: Dic de 2010).
14. [www.amti.ogr.mx](http://www.amti.ogr.mx) (último acceso: Jun-Dic de 2010).
15. <http://www.intermodalmexico.com.mx/> (último acceso: Jun-Dic de 2010)
16. <http://www.puertolazarocardenas.com.mx> (último acceso: Jun-Dic de 2010).
17. <http://www.puertomanzanillo.com.mx> (último acceso: Jun-Dic de 2010).

# **Anexos**

# Anexo 1. Código del Programa Gams

```
1 $Title A Transportation Problem (TRANSPORT,SEQ=1)
2 $Ontext
3
4 Este problema minimiza el costo de transportar contenedores desde los puertos»
   de Manzanillo y Lazaro Cardenas a los puntos fronterizos, utilizando nodos i»
   nteriores de transbordo.
5
6
7 $Offtext
8
9
10 Sets
11 i nodos / manz, lazc, pant, gto, gro, gmzp, mty, cdj, nlar, ma»
   t /
12 j autot / manz-gto, lazc-pant, lazc-gro, gro-pant, pant-gro, q»
   ro-gto, gto-gro, gto-cdj, gro-mty, mty-nlar, mty-mat /
13 k fxe / manz-gto, gro-pant, pant-gro, gro-gto, gto-gro, gto-»
   gmzp, gmzp-cdj, gmzp-mty /
14 l fkcs / lazc-pant, lazc-gro, gro-pant, pant-gro, gro-mty, mt»
   y-nlar, mty-mat /;
15
16 Parameters
17
18 a(i) recursos
19 / manz -600
20 lazc -800
21 pant 0
22 gto 0
23 gro 0
24 gmzp 0
25 mty 0
26 cdj 400
27 nlar 700
28 mat 300 /
29
30
31 d1(j) distancia autotransporte
32 / manz-gto 560
33 lazc-pant 658
34 lazc-gro 561
35 gro-pant 191
36 pant-gro 191
37 gro-gto 197
38 gto-gro 197
39 gto-cdj 1470
40 gro-mty 766
41 mty-nlar 221
42 mty-mat 311 /
43
44 d2(k) distancia ferromex
45 / manz-gto 628
46 gro-pant 134
47 pant-gro 134
48 gro-gto 255
49 gto-gro 255
50 gto-gmzp 762
51 gmzp-cdj 831
52 gmzp-mty 374 /
53
54 d3(l) distancia kcs
55 / lazc-pant 615
```

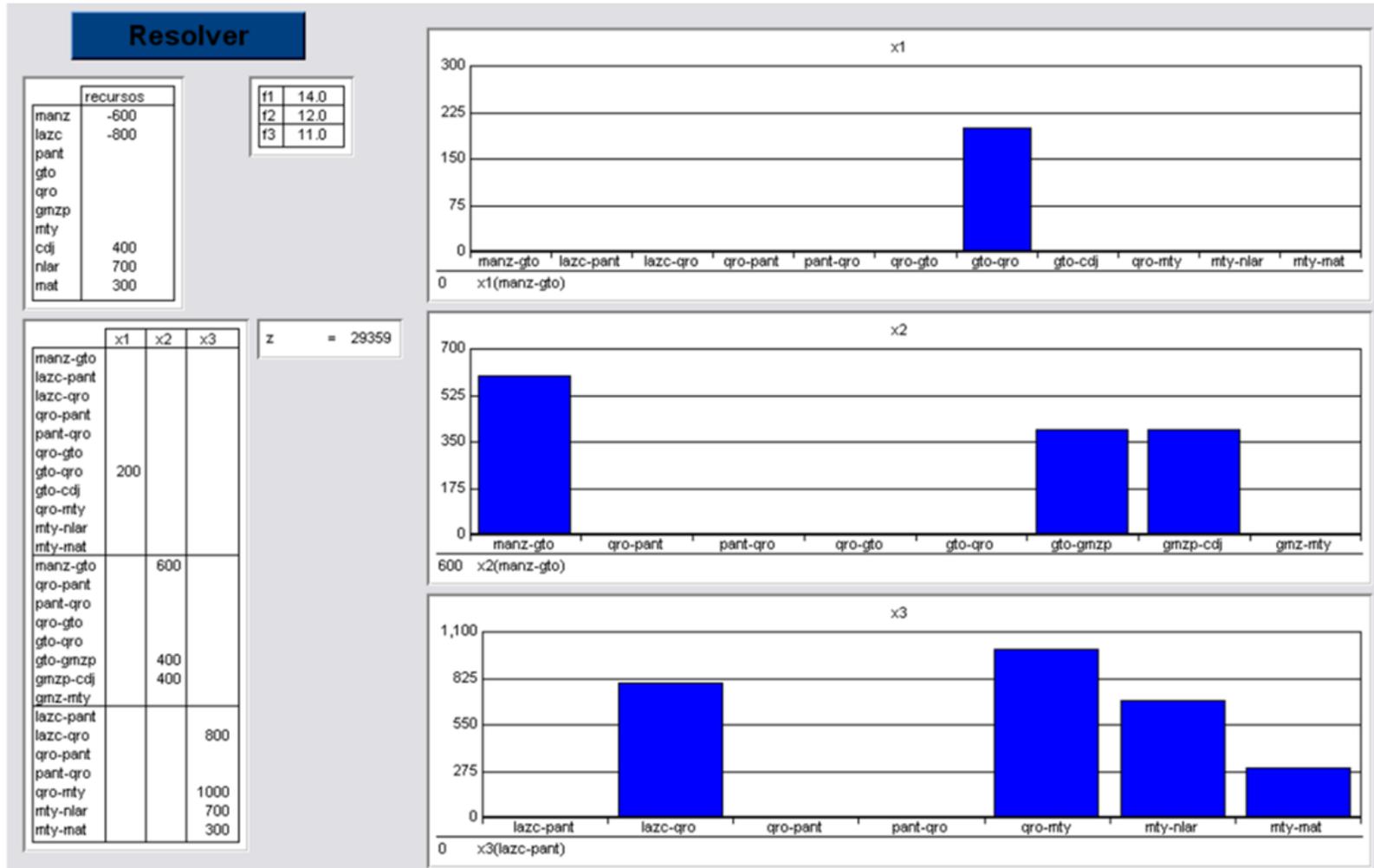
```

56          lazc-qro          610
57          gro-pant         255
58          pant-qro         255
59          gro-mty          739
60          mty-nlar         265
61          mty-mat          334 ;
62
63
64 Table m1(i,j)  matriz de incidencia autotransporte
65          manz-gto lazc-pant lazc-qro gro-pant pant-qro gro-gto»
gto-qro  gto-cdj gro-mty mty-nlar mty-mat
66      manz          -1
67      lazc          -1          -1
68      pant          1          -1
69      gto           1
-1      -1
70      gro           1          -1          1          -1 »
1
71      mty           -1
1          1          -1          -1
72      cdj           1
nlar
73      nlar          1
74      mat           1
1 ;
75
76 Table m2(i,k)  matriz de incidencia ferromex
77          manz-gto gro-pant pant-qro gro-gto gto-qro gto-gmzp »
gmzp-cdj gmzp-mty
78      manz          -1
79      pant          1          -1
80      gto           1          1          -1          -1
81      gro           -1          1          -1          1
82      gmzp          1
-1      -1
83      mty           1
84      cdj           1
1          ;
85
86 Table m3(i,l)  matriz de incidencia kcsn
87          lazc-pant lazc-qro gro-pant pant-qro gro-mty mty-nlar»
mty-mat
88      lazc          -1          -1
89      pant          1          1          -1
90      gro           1          -1          1          -1
91      mty           -1          1          -1 »
-1
92      nlar          1
93      mat           1 ;
94
95 Scalar f1  carga en pesos por unidad por km autotransporte /14/ ;
96 Scalar f2  carga en pesos por unidad por km ferromex /12/ ;
97 Scalar f3  carga en pesos por unidad por km kcsn /11/ ;
98
99 Parameter c1(j)  costo de autotransporte en miles de pesos por unidad ;
100
101          c1(j) = f1 * d1(j) / 1000 ;
102

```

```
103 Parameter c2(k) costo de ferromex en miles de pesos por unidad ;
104
105         c2(k) = f2 * d2(k) / 1000 ;
106
107 Parameter c3(l) costo de kcsn en miles de pesos por unidad ;
108
109         c3(l) = f3 * d3(l) / 1000 ;
110
111 Variables
112     x1(j) cantidad transportada en unidades por autotransporte
113     x2(k) cantidad transportada en unidades en ferromex
114     x3(l) cantidad transportada en unidades en kcsn
115     z      costo total de transporte en miles de pesos ;
116
117 Positive Variable x1, x2, x3;
118
119 Equations
120     cost      definicion de funcion objetivo
121     restric(i) oferta del origen i;
122
123     cost ..      z =e= sum(j, c1(j)*x1(j)) + sum(k, c2(k)*x2(k)) + sum(l, c»
124     3(l)*x3(l));
125     restric(i) .. sum(j, m1(i,j)*x1(j)) + sum(k, m2(i,k)*x2(k)) + sum(l, m3(i»
126     ,l)*x3(l))=g= a(i) ;
127
128 Model transport /all/ ;
129
130 Solve transport using lp minimizing z ;
131
132 Display X1.L, X2.L, X3.L, Z.L;
```

# Anexo 2. Hoja de datos del programa Aimms



# Anexo 3. Código de Recocido en Matlab

14/01/11 07:09 PM C:\Documents and Settings\ALMC\Mis documen...\transbordo.m 1 of 2

```
options.Resize='on';
options.WindowStyle= 'modal' ;
clear
clc

%recocido simulado aplicado al problema del transporte

tem_ini =100;
tem_fin = 30;
max_iter_ini = 10;
alpha = 0.8;

%solucion inicial se genera vector con ceros y unos
inicial=zeros(11,3);
i=11;
j=3;
sol_ini =inicio (inicial,i,j);

costo_ini= -1 * costoruta_t (sol_ini,i,j); %medir la calidad de la solucion inicial

sol_act = sol_ini;
cost_act = costo_ini;
temp = tem_ini;
max_iter = max_iter_ini;
best_sol = sol_act;
best_cost = cost_act;
best_temp = temp;
u=1;

while temp > tem_fin
    prom_cost_act = 0;
    for iter = 1:max_iter;
        sol_new =perturbacion_t(sol_act,i,j);

        cost_new = -1* costoruta_t(sol_new,i,j);
        E= cost_new - cost_act;

        if E>0
            sol_act =sol_new;
            cost_act = cost_new;
            if cost_new> best_cost
                best_sol = sol_new;
                best_cost = cost_new;
                best_temp =temp;
            end
        else
            aleatorio = rand;
            valor = exp(E/temp);
            if aleatorio < valor
                sol_act = sol_new;
                cost_act=cost_new;
            end
        end
        prom_cost_act = prom_cost_act + cost_act;
```

```
end;
prom_cost_act = prom_cost_act/max_iter;
grafico_best_cost (u) = best_cost;
grafico_act_cost (u) = prom_cost_act;

u= u+1;
temp = temp*alpha;
sol_act = best_sol;
cost_act= best_cost;
end;

plot (grafico_best_cost, 'r-');
hold on;
plot (grafico_act_cost, 'b-');
hold off;
```

# Anexo 4. Código de la Función de Evaluación

19/01/11 09:08 AM C:\Documents and Settings\ALMC\Mis docume...\costoruta\_t.m 1 of 2

```
function f = costoruta_t( ruta,i,j )
%calculo del costo de la asignacion de coches

i=10;
j=11;
k=8;
l=7;

ruta1=ruta(1:j,1);
ruta2=ruta(1:k,2);
ruta3=ruta(1:l,3);

f1=14; %costo por unidad utilizando autotransporte
f2=12; %costo por unidad utilizando ferromex
f3=11; %costo por unidad utilizando kcsm
a=importdata('a.mat');
d1=importdata('d1.mat');
d2=importdata('d2.mat');
d3=importdata('d3.mat');
m1=importdata('m1.mat');
m2=importdata('m2.mat');
m3=importdata('m3.mat');

costo_r1=0;
costo_r2=0;
costo_r3=0;

for u=1:j
c1(u)=f1*d1(u)/1000;
costo_r1 = costo_r1 + c1 (u) * ruta1 (u);
end
for v=1:k
c2(v)=f2*d2(v)/1000;
costo_r2 = costo_r2 + c2 (v) * ruta2 (v);
end
for w=1:l
c3(w)=f3*d3(w)/1000;
costo_r3 = costo_r3 + c3 (w) * ruta3 (w);
end

sub1=0;
sub2=0;
sub3=0;
cambio_modo=0;

for n=1:i
for u=1:j
sub1(u)= m1(n,u)*ruta1(u);
end
sub1t(n)=sum(sub1);
for v=1:k
sub2(v)= m2(n,v)*ruta2(v);
end
sub2t(n)=sum(sub2);
for w=1:l
```

```
        sub3(w)= m3(n,w)*ruta3(w);
    end
    sub3t(n)=sum(sub3);
    recursos(n)= sub1t(n) + sub2t(n) + sub3t(n);
    if recursos(n)>=a(n)
        pen(n)=0;
    else
        pen(n)=1000; %penalizacion por cada restriccion que no se cumpla
    end

    if sub1t(n)>0 && (sub2t(n)<0 || sub3t(n)<0)
        cambio_modos(n)=500; %cambio de autotransporte a ferrocarril
    elseif sub1t(n)<0 && (sub2t(n)>0 || sub3t(n)>0)
        cambio_modos(n)=600; %cambio de ferrocarril a autotransporte
    end

end
costo_total=costo_r1 + costo_r2+ costo_r3 + sum(pen) + sum(cambio_modos);

f = costo_total;

end
```

# Anexo 5. Código de la Función de Perturbación

19/01/11 09:08 AM C:\Documents and Settings\ALMC\Mis doc...\perturbacion\_t.m 1 of 1

```
function f = perturbacion_t (sol,i,j )
%funcion perturbacion para modificar una solucion

j=11;
k=8;
l=7;

ruta1=sol(1:j,1);
ruta2=sol(1:k,2);
ruta3=sol(1:l,3);

prom1=mean(ruta1);
prom2=mean(ruta2);
prom3=mean(ruta3);

devest1=std(ruta1);
devest2=std(ruta2);
devest3=std(ruta3);

fila_1= randint (1,1,[1,j]);
v_colum =0;
while v_colum ==0; % seleccion de la columna asociada a la fila_1
    fila_1= randint (1,1,[1,j]);
    v_colum = sol (fila_1,1);
end

fila_2= randint (1,1,[1,k]);
v_colum =0;
while v_colum ==0; % seleccion de la columna asociada a la fila_2
    fila_2= randint (1,1,[1,k]);
    v_colum = sol (fila_2,1);
end

fila_3= randint (1,1,[1,l]);
v_colum =0;
while v_colum ==0; % seleccion de la columna asociada a la fila_3
    fila_3= randint (1,1,[1,l]);
    v_colum = sol (fila_3,1);
end

sol(fila_1,1)= sol(fila_1,1)+ int(normrnd(prom1,devest1));
sol(fila_2,2)= sol(fila_2,2)+ int(normrnd(prom2,devest2));
sol(fila_3,3)= sol(fila_3,3)+ int(normrnd(prom3,devest3));

f=sol;

end
```

# Glosario

## Términos

**CONTENEDOR.** Cajón de dimensiones normalizadas que sirve para simplificar significativamente las operaciones de carga, descarga y transferencia.

**CONTENERIZADO.** Carga que se transporta dentro de un contenedor.

**INTERMODAL.** Se refiere a la relación entre diversos medios de transporte que buscan ofrecer soluciones conjuntas.

**MEDIOS.** Son los vehículos utilizados.

**MODOS.** Están determinados por el entorno físico en el que se desplazan los bienes (marítimo, aéreo, terrestre).

**MULTIMODAL.** Está relacionado con la responsabilidad ya que se vincula a un solo contrato para mover mercancías por lo menos a través de dos modos diferentes de transporte.

**RECOCIDO SIMULADO.** Es un proceso computacional que refleja los pasos establecidos en el proceso físico de tratamiento térmico de materiales.

## Abreviaturas

**AIMMS.** (Advanced Integrated Multidimensional Modeling Software) Posibilita una combinación de métodos matemáticos y de herramientas de desarrollo.

**AMTI.** Asociación Mexicana de Transporte Intermodal.

GAMS. El Sistema General de Modelaje Algebraico está diseñado específicamente para modelar problemas de optimización tanto lineales, no lineales o de enteros mezclados.

MATLAB. (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") Es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M).

NP. Clase de problemas que pueden resolverse en tiempo no-polinómico.

NP-HARD. La clase compleja de problemas de decisión que son intrínsecamente más difíciles que los que pueden ser resueltos por una máquina de Turing no determinista en tiempo polinómico.

OCDE. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.

P. Clase de problemas que pueden resolverse en tiempo polinómico.

TEU. (Twenty-foot Equivalent Unit) traducido como Unidad Equivalente de Veinte pies.