
MODELOS DE REDES DE CARGA: ESTADO DEL ARTE TRANSPORTE INTERURBANO

J. Enrique Fernández L. y Joaquín de Cea Ch.

Dpto. Ingeniería de Transporte,

U. Católica de Chile

Casilla 306, Santiago 22, CHILE

RESUMEN

Los sistemas de transporte interurbano pueden ser representados a través de modelos de redes multimodales; estos últimos han experimentado un fuerte desarrollo durante las últimas dos décadas en su aplicación a sistemas urbanos de transporte de pasajeros, sin embargo su aplicación a sistemas interurbanos ha sido mucho más limitada. Por otra parte, aunque los principios de modelación relacionados con teoría de grafos y redes, modelos matemáticos de optimización y principios de teoría microeconómica, son útiles para tratar ambos problemas, sus características específicas son bastante diferentes, haciendo que no sea posible realizar una extensión o adaptación de modelos desarrollados en un caso (por ejemplo urbano) a su aplicación en el otro (por ejemplo interurbano).

En este trabajo se realiza un análisis crítico de la literatura respecto del desarrollo de modelos de transporte interurbano de carga. En cada caso se estudian los supuestos y planteamientos teóricos básicos y las implicancias para su aplicación práctica, y se efectúa un análisis comparativo para el caso de los modelos de redes, en el que se evalúan las ventajas y limitaciones de los distintos enfoques propuestos en la literatura especializada. Como conclusión se especifican los aspectos más relevantes que requieren de investigación y desarrollos futuros y las formas posibles de enfrentar dichos desarrollos.

La presente investigación ha sido parcialmente financiada por FONDECYT-Chile y la Pontificia Universidad Católica de Chile.



1. INTRODUCCION

La modelación de los flujos interurbanos de carga presenta una gran complejidad inherente, lo que ha llevado a distintos autores a tomar diversos enfoques desde la perspectiva de diferentes disciplinas. Es así como podemos encontrar en la literatura modelos que tratan de representar y explicar desde el comportamiento de los agentes individuales en la elección de rutas, hasta el fenómeno de entrada y salida de empresas del mercado de transporte interurbano de carga. Sin embargo, en el centro de todos estos modelos está presente el concepto de la predicción del comportamiento de los diversos agentes que intervienen en el movimiento de la carga.

Harker (1987), propone el diagrama de la Figura 1 para representar los distintos agentes que normalmente participan y las interrelaciones que entre ellos se producen. Los **productores** son los agentes económicos que producen los bienes; los **consumidores** demandan dichos bienes para el consumo. Típicamente, se consideran distintos sub-grupos de productores y consumidores que se localizan en diversas zonas dentro de la región que se desea analizar, los que se comunican mediante el conjunto de precios de los bienes y servicios que ellos venden y compran. Por lo tanto, si las distintas zonas consideradas se encuentran unidas por un sistema de transporte y hay intercambio entre ellas, debe existir un conjunto de agentes, denominados **despachadores (shippers)** que cumplen la función de administrar el movimiento de la carga desde su origen hasta su destino. En la práctica ellos están representados por un conjunto de entidades tales como los departamentos de despacho de empresas manufactureras, departamentos de distribución, despachadores de carga independientes, departamentos recibidores de carga de las empresas, etc.

En general, los despachadores, son el conjunto de los agentes que toman las decisiones relativas a la forma operacional en que la carga se mueve dentro del área bajo estudio: la generación de viajes desde cada origen, su distribución hacia los distintos destinos posibles, y el conjunto de modos y empresas de transporte que tomarán parte en el traslado de la carga. Las elecciones que los despachadores realizan se basan en las condiciones que el mercado plantea que se resumen en los precios observados.

Una de las decisiones más importantes que los despachadores deben tomar se refiere al conjunto de modos que se utilizarán en el transporte de la carga desde su origen hasta su destino y en particular las empresas que realizarán el servicio; a estas se les denomina **transportistas (carriers)** y su función propia es la producción de servicios de transporte. Se supone además que su objetivo fundamental es maximizar el beneficio obtenido de su operación.

Por lo tanto, despachadores y transportistas son respectivamente los demandantes (consumidores) y oferentes (productores), en el mercado de servicios de transporte. Harker (1987) denomina decisiones de ruteo de los despachadores, a la elección que estos realizan de uno o varios transportistas (cadena de servicios) para mover la carga; a través de dicho proceso, los despachadores crean una demanda por servicios de transporte, que es el producto de los transportistas. Estos a su vez producen una oferta de servicios de transporte, que en su conjunto determinará un nivel de servicio del sistema. Esta interrelación se representa por una flecha bidireccional en la Figura 1.



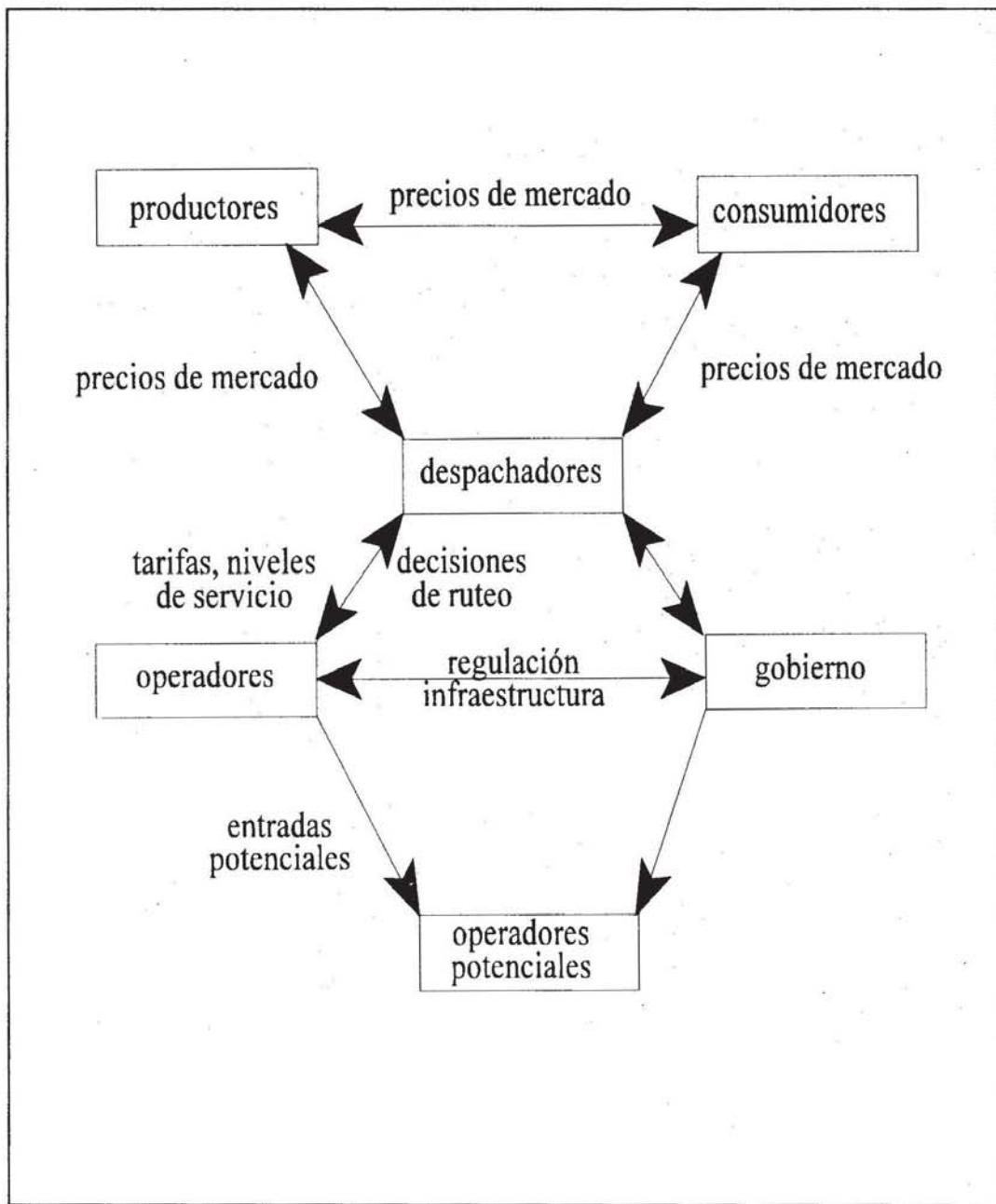


Figura 1. Relaciones en el Mercado de Transporte de Carga

Normalmente, el sistema de transporte de carga se considera además integrado por otros dos agentes: los **transportistas potenciales** y el **Gobierno**. Los primeros son agentes que normalmente no realizan servicios de transporte, pero tienen el potencial de hacerlo y por lo tanto influyen en el establecimiento de las tarifas de los servicios, dada la presión que su potencial entrada al mercado ejerce sobre los operadores normales. El segundo está representado por todas las agencias estatales relevantes, tanto de nivel central, como regional y local. Ellas influyen en el sistema fundamentalmente a través de las regulaciones que imponen a la operación y de la provisión y mantenimiento de infraestructura.



2. MODELOS DE REDES DE TRANSPORTE DE CARGA

Una red representa al sistema de transporte, como un conjunto de arcos y nodos con una topología definida, que especifica la estructuración espacial y funcional de los distintos servicios de transporte ofrecidos y que generalmente coincide además con la distribución física de la infraestructura. En el caso interurbano, los nodos representan lugares de acceso a la red de servicios o de encuentro de distintos modos: puertos, aeropuertos, patios ferroviarios etc.; los arcos representan vías sobre las cuales se movilizan los vehículos: carreteras, autopistas, líneas férreas, vías de navegación, etc. En general, cada elemento de la red lleva además asociado un índice del nivel de servicio y/o de los costos de operación experimentados, el que en las representaciones más sencillas es constante pero en los modelos más sofisticados corresponde a una función que depende del flujo y la capacidad del elemento en cuestión.

Los modelos de redes típicos suponen un análisis de corto plazo, en el que dado un cierto capital invertido en la red y por lo tanto características definidas de capacidad y costos de operación, que estructuran una función global de oferta de corto plazo, se predicen los flujos y niveles de servicio que se observarían si se consideraran determinadas demandas entre los diferentes pares Origen-Destino, las que pueden ser constantes o elásticas dependiendo del caso. A continuación revisaremos los modelos de redes de transporte de carga más importantes que han sido desarrollados y reportados en la literatura especializada desde 1960.

2.1 El Modelo Harvard-Brookings.

Sin duda este es el primer desarrollo significativo de un modelo predictivo de redes de transporte interurbano de carga. Creado inicialmente por Roberts (1966) y extendido posteriormente por Kresge y Roberts (1971) fue usado en Colombia para la elaboración de un plan de desarrollo del sistema de transporte interurbano de dicho país.

Este modelo usa una red multimodal, incluyendo carreteras, ferrocarriles, rutas marítimas y rutas aéreas y distingue distintos productos a ser transportados. Sin embargo, solo considera la simulación del comportamiento de los despachadores, que son los únicos agentes representados. Los costos de operación de los modos de transporte se suponen constantes y la elección de modo y ruta por parte de los despachadores se basa en el cálculo de rutas mínimas sobre la red multimodal, para cada tipo de producto separadamente. Los costos de transporte resultantes se usan en dos submodelos de distribución distintos, dependiendo del tipo de producto: i) un sub-modelo estándar del tipo Koppmans-Hitchcock (K-H), que calcula los flujos O-D para productos homogéneos de bajo valor agregado (principalmente graneles) ii) un submodelo gravitacional estándar (Isard, 1975, Cap. 3) para los productos especiales de alto valor agregado. Las generaciones y atracciones necesarias para especificar las restricciones de los submodelos de distribución se obtienen en forma externa, a partir de un modelo macroeconómico.

Una vez obtenidos los flujos O-D por cada tipo de producto, estos se asignan a la red multimodal usando las mismas rutas mínimas calculadas inicialmente. Nótese que, dado que se supone que no existe congestión, no es necesario revisar los costos de operación calculados inicialmente, ya que



estos son independientes del nivel de flujo asignado. El procedimiento de asignación se completa cargando volúmenes apropiados para considerar el retorno de los vehículos vacíos a su punto de origen.

2.2 El Modelo de Redes de Transporte de CACI.

Este modelo fue desarrollado por CACI Inc., como parte del Estudio Nacional de Energía y Transporte (CACI, 1980, Bronzini, 1980a-c) y su objetivo inicial fue estudiar la eficiencia energética de los distintos modos de transporte de carga interurbanos, debido a lo cual se realizó una representación de los costos de energía más detallada que lo que es normal en este tipo de modelos.

La versión original es multimodal y multiproducto, aunque las demandas por transporte son fijas entre pares O-D. Los supuestos básicos son los siguientes:

- El ruteo de la carga es resultado exclusivo de las decisiones de los despachadores, cuyo objetivo es encontrar las rutas de costo mínimo.
- El costo relevante para las decisiones de ruteo se obtiene mediante una combinación lineal del costo de operación, el tiempo de viaje y el uso de energía.

Estos supuestos ignoran por completo el rol que cumplen los transportistas en el ruteo de los envíos de la carga y utilizan una expresión inusual del costo de transporte, al mezclar en una misma medida factores que son de interés para los transportistas, como el costo de operación, con otros percibidos por los despachadores y usuarios como el tiempo de viaje.

A pesar de que sus creadores califican la versión más reciente del modelo como de equilibrio y multiproducto, el procedimiento de asignación de equilibrio usado trabaja con funciones de costos agregadas (para el conjunto de los productos), en vez de diferenciadas por producto, lo cual es equivalente a considerar un solo producto. En la última versión, se incluye un submodelo separado que simula las decisiones de ruteo de los transportistas (Bronzini y Sherman, 1983) pero que usa costos fijos y asignación a rutas mínimas.

2.3 Modelo de Peterson.

Peterson propuso un modelo (Peterson y Fullerton, 1975) predictivo de transporte ferroviario que utiliza alternativamente los dos principios de comportamiento de Wardrop para modelar las decisiones de los operadores de transporte, aunque el autor opina que el segundo principio (optimización de sistema) es más adecuado para modelar sistemas de transporte de carga.

La formulación está basada en un problema de programación matemática, en el que se minimiza una función objetivo que está construida usando funciones no lineales de tiempo de viaje sobre los arcos de la red, que son función de los flujos agregados que los utilizan; las restricciones corresponden a las típicas conservaciones y nonnegatividad de los flujos. En la solución se utiliza el conocido algoritmo de Frank-Wolf propuesto por Leblanc et al., (1975).



Las demandas por transporte son constantes y determinadas exógenamente y se considera un solo producto y un solo operador. Además, tampoco se modela el retorno de los vehículos vacíos.

2.4 Modelo de Lansdowne.

Aunque este modelo es menos general que los anteriores, es de interés por ser el primero que incluye las interacciones que se presentan entre despachadores y transportistas (operadores) (Lansdowne, 1981). El modelo es unimodal y considera demanda fija, la que se le debe entregar a través de una matriz de viajes en ferrocarril. Como resultado, entrega un conjunto de rutas ferroviarias incluyendo la localización de las interlineas, que corresponden a los puntos de la red en que el control de la carga es transferido de un operador a otro. Las decisiones de elección de ruta incluyendo el número y localización de las interlineas es determinado conjuntamente por los despachadores y transportistas involucrados. A pesar de que el punto de transferencia de la carga (interlinea) puede ser especificado por el despachador, es más comúnmente determinado por el primer operador que interviene en la cadena de transporte; este tiene por objetivo maximizar su beneficio económico, pero debe ofrecer un nivel de servicio razonable al despachador a fin de mantenerlo como cliente. Los principios usados en la modelación son los siguientes:

- La elección de rutas considera como criterio, minimizar el número de interlíneas.
- Los operadores eligen la ruta mínima dentro de su propia red.
- Si existen varias rutas elegibles se escoge la que maximiza el ingreso percibido por el primer operador en la cadena de transporte.
- Si existe más de un operador inicial potencial la carga se divide entre todos ellos de acuerdo con alguna regla pre especificada.

A pesar de que el proceso de transferencia de la carga en los puntos interlínea ocasiona costos, demoras e incertidumbres adicionales que normalmente tratan de evitarse, la aplicación del primer principio especificado ignora varios factores importantes en la operación real de un sistema de transporte de carga; por ejemplo, las condiciones y trazado de las líneas y las demoras causadas por la congestión existente en las líneas y patios intermedios, influyen en forma importante en la elección de ruta en la práctica. El segundo, y cuarto principios, parecen razonables y el segundo se basa en el reconocimiento de la fuerte posición negociadora que tiene el primer operador con respecto al resto de los subsecuentes operadores, dado que el aporta el equipo y negocia las tarifas con el despachador. El modelo no considera el problema del retorno del equipo vacío.

2.5 El modelo de Princeton.

Este es también un modelo ferroviario (Kornhauser et al., 1979) conformado por dos submodelos. El primero simula las decisiones de ruteo al interior de un operador y el segundo determina los movimientos entre distintos operadores. Las rutas al interior de un operador son determinadas calculando rutas mínimas sobre la subred correspondiente y suponiendo costos fijos en cada arco.



Los movimientos entre operadores son determinados considerando una red total, que incluye las de todos los operadores, unidas por arcos especiales que representan los puntos de interlinea; a estos arcos se les asigna un elevado costo de operación a fin de evitar que sean elegidos con demasiada frecuencia. En ambos modelos se utilizan libre y discrecionalmente los costos de operación sobre los arcos, como parámetros de calibración a fin de obtener el mejor ajuste posible entre los flujos observados y los modelados. No se considera el retorno de vehículos vacíos.

2.6 Otros Modelos.

Los dos modelos más importantes desarrollados a la fecha: i) el Modelo de Equilibrio de Redes de Transporte de Carga (Freight Network Equilibrium Model: FNEM) y ii) el Modelo de Planificación Estratégica para Flujos Multiproducto de Carga Interurbanos (STAN), serán tratados en forma separada en las secciones siguientes. Estos modelos son los más sofisticados disponibles y constituyen el estado del arte en materia de modelos interurbanos de redes de transporte de carga y por lo tanto merecen un análisis más detallado. Antes de ello revisaremos sin embargo un enfoque alternativo de modelación, que es complementario al revisado en la presente sección y que algunos autores han propuesto recientemente integrar con los modelos de redes más desarrollados existentes, Friesz et al., (1993).

3. MODELOS DE EQUILIBRIO ESPACIAL DE PRECIOS

Al igual que los modelos revisados en la sección anterior, estos utilizan una representación explícita del sistema de transporte mediante una red. En este caso sin embargo se consideran solo las interacciones entre productores, consumidores y despachadores, correspondientes a las representadas en el triángulo superior de la Figura 1; los transportistas u operadores se dejan fuera del análisis y en su lugar se definen funciones de costo de transporte sobre los elementos de la red, que los representan en forma indirecta. En general la representación de la red o sistema de transporte es más bien agregada y simplificada.

El modelo considera un conjunto de nodos que se pueden clasificar en dos clases diferentes: centroides, que representan regiones productoras y/o consumidoras y nodos de transferencia (ruteadores) que corresponden a puntos de intersección (o confluencia) de distintos arcos de la red, en los que no existe generación ni atracción de viajes, sino que únicamente transferencia de flujos. Los arcos pueden ya sea conectar directamente distintos centroides, o hacerlo a través de una serie de nodos de transferencia. A cada centroide que representa una región productora se le asocia una función de oferta y una función de demanda a cada región consumidora. Sobre dicha red se busca un conjunto de flujos de equilibrio caracterizados por las siguientes dos condiciones:

- Si existe un flujo del producto "k" desde la región A (exportadora) hacia la región B (importadora), entonces el precio final de equilibrio en la región A más el costo de transporte entre A y B, debe ser igual al precio final de equilibrio en la región B.
- Si el precio final del producto "k" en la región A más el costo de transporte entre A y B es mayor que el precio final en la región B, entonces no puede haber flujo desde A hacia B.



En este modelo las demandas por transporte son **derivadas** de la necesidad de mover los productos entre regiones exportadoras e importadoras, que alcanzan un equilibrio espacial de precios, cuando están unidas por un sistema de transporte.

La noción de equilibrio entre mercados espacialmente separados y las demandas de transporte resultantes ha sido desarrollada por diversos autores.

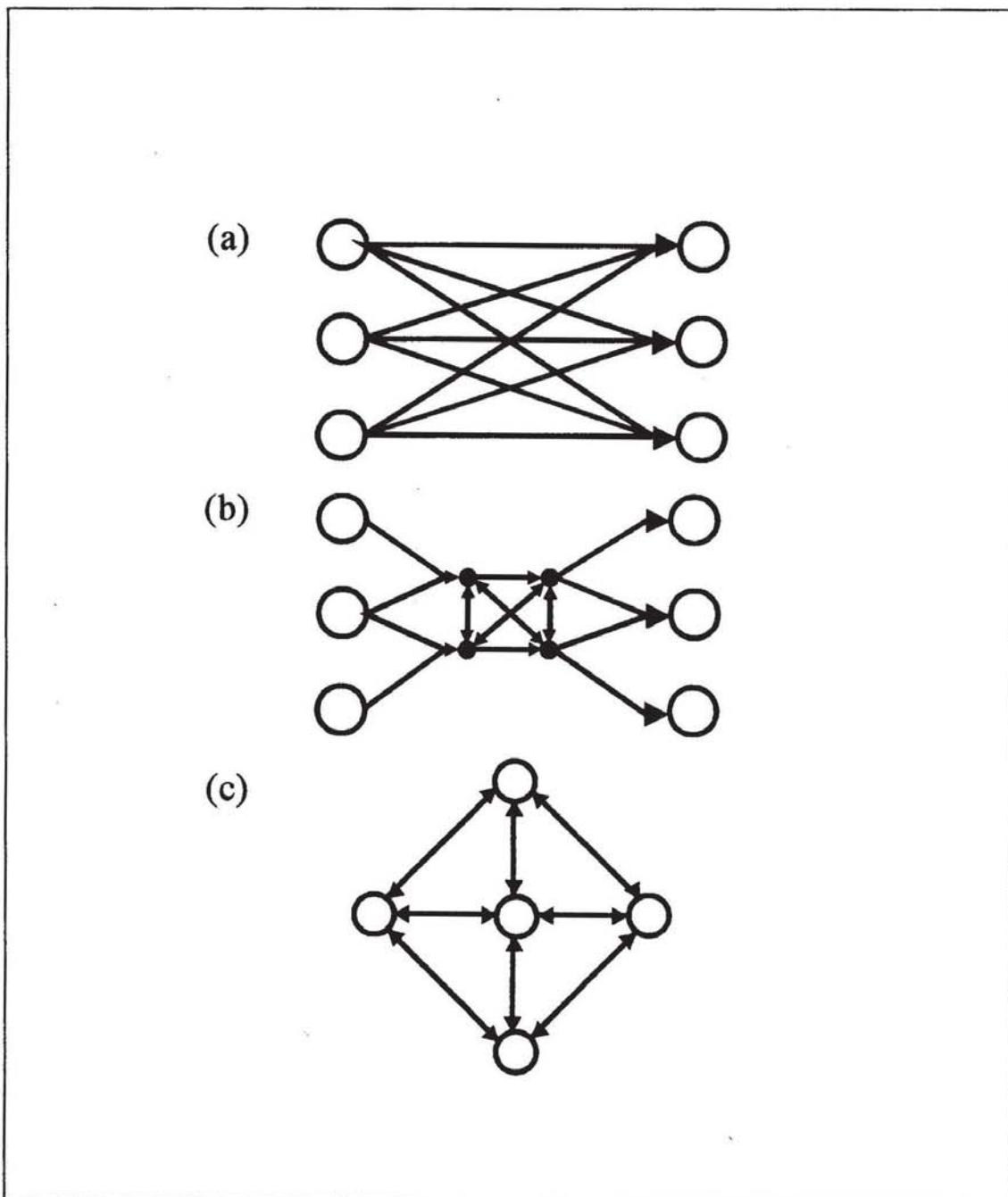


Figura 2. Redes consideradas en los Modelos de Equilibrio Espacial de Precios



En un paper clásico en este tema, Samuelson (1952) elabora el enfoque anterior proponiendo una formulación, basada en programación matemática, como un problema de optimización, sobre una red como la de la figura 2-a. Usando una función objetivo que interpreta como "beneficio social neto", aplica las condiciones de Kuhn-Tucker para obtener las condiciones matemáticas de un equilibrio espacial de precios.

Beckman, et al., (1956) en un capítulo acerca de "Algunos Problemas no Resueltos", plantea que el modelo de equilibrio espacial de precios sería muy útil en el análisis de sistemas de transporte de carga. Takayama y Judge (1964 y 1971), plantean un problema de programación cuadrática suponiendo que las funciones de oferta y demanda tienen una forma lineal y los costos de transporte son constantes e independientes de los flujos. El modelo considera varios productos y los autores lo aplican para resolver un ejemplo.

Florian y Los (1982), consideran una red con nodos de transferencia, como la mostrada en la Figura 2.2-b, y funciones no lineales, para formular un problema de optimización cuya solución corresponda a un equilibrio espacial de precios. Sin embargo, su procedimiento de solución presenta problemas debido a que está basado en un enfoque que requiere enumeración de rutas entre pares O-D.

Tobin y Friesz (1983), usan una red general del tipo presentado en la Figura 2.2-c, en la que un nodo puede representar un origen, un destino o un punto de transferencia. A partir de dicha formulación muestran que no es necesario considerar explícitamente los flujos en rutas (como en el caso de Florian y Los, 1982), con lo que se reduce considerablemente el esfuerzo computacional requerido para obtener una solución. Sin embargo, este enfoque de modelación supone en forma implícita que existe sustituibilidad de productos en cada nodo de la red; esto quiere decir que en un nodo de transferencia, los flujos que entran y salen no pueden ser identificados y distinguidos según su destino final. Esto resulta en una modelación poco realista en aquellas situaciones en que se requiere identificar movimientos específicos entre pares O-D, como es el caso de carros de ferrocarril (Harker, 1985). Los autores examinan también las propiedades de existencia y unicidad de las soluciones, para lo cual usan una formulación como problema complementario no lineal (PCN) y analizan las características de convergencia de un algoritmo de solución correspondiente.

Existen varias aplicaciones de este concepto en estudios de transporte de carga, sin embargo, pocas de ellas consideran un enfoque multiproducto y la mayoría corresponde al análisis de los sectores agrícola y de energía.

4. EL ESTADO DEL ARTE EN MODELOS DE REDES DE TRANSPORTE DE CARGA

El estado del arte en la modelación de redes de transporte interurbano de carga, está representado fundamentalmente por dos modelos: i) el Modelo de Equilibrio de Redes de Transporte de Carga (Freight Network Equilibrium Model: FNEM) y ii) el Modelo de Planificación Estratégica para Flujos Multiproducto de Carga Interurbanos (STAN). A continuación se hace un análisis de cada uno de ellos:



4.1 El Modelo de Equilibrio en Redes de Transporte de Carga (FNEM).

Este modelo (FNEM) fue desarrollado por un equipo conjunto de investigadores de la Universidad de Pennsylvania (Penn) y el Argonne National Laboratory (ANL), bajo el patrocinio del Departamento de Energía de los Estados Unidos de Norte América. Una descripción conceptual del modelo puede encontrarse en Friesz et al., (1981) y una descripción resumida se entrega en Friesz et al., (1983b).

Las características más importantes de FNEM son las siguientes:

- Se modelan en forma explícita las decisiones de despachadores y operadores (transportistas).
- Se usan dos redes distintas: una agregada para modelar el comportamiento de los despachadores y otra desagregada para modelar el comportamiento de los operadores.
- Se consideran distintos modos y diferentes productos en forma simultánea.
- Las funciones de costos y demoras consideradas tienen una forma no lineal.
- Los costos y las demoras dependen de la congestión en el sistema, la que es determinada por los niveles de flujos que usan cada elemento de la red multimodal.
- Las producciones y atracciones de los productos a ser transportados son fijas, pero su distribución O-D es variable.

FNEM, modela las decisiones de los despachadores y operadores en forma secuencial, tal como se representa en el diagrama de la Figura 3. Se supone, que los despachadores tratan unilateralmente de minimizar el precio de entrega final de los productos que envían, el que se compone de la suma del precio en origen más el costo de transporte (que incluye la tarifa y el costo económico del tiempo de viaje), por lo que su comportamiento puede representarse mediante una variante del primer principio de Wardrop (equilibrio de usuarios).

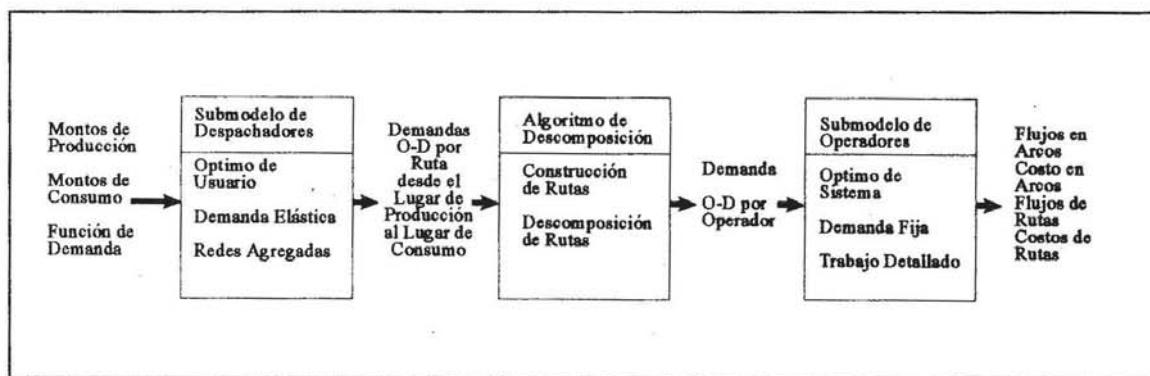


Figura 3. Estructura del Modelo secuencial Despachador-Operador



Por lo tanto, el submodelo de despachadores considera demandas elásticas en términos de distribución y su representación analítica corresponde a un problema de programación matemática (problema de optimización). Además, usa una representación agregada de la red, que considera arcos sintéticos entre nodos, que pueden ser centroides, nodos de transferencia, o interlineas; cada uno de dichos arcos corresponderá en la práctica a un conjunto de arcos reales, o una sección completa de la red de un operador. La solución de este submodelo, conduce a la determinación de cantidades demandadas, por producto, despachador, modo o combinación de modos que sean utilizados, y por operador.

FNEM usa un detallado procedimiento de tipo contable, que está implementado en un algoritmo denominado de descomposición (Figura 3), para determinar las matrices O-D correspondientes a cada operador que controla una subred.

Cada operador corresponde a una empresa, que se supone actúa de acuerdo a un criterio de maximización de beneficios; sin embargo, dado que en el enfoque secuencial utilizado, el submodelo de los operadores recibe matrices fijas de demandas por transporte entre pares O-D, determinadas por los despachadores (correspondiente al resultado del submodelo de despachadores) el ingreso percibido será constante y por lo tanto puede considerarse que maximización de beneficios es equivalente a minimización de costos. Por lo tanto, el comportamiento de los operadores es representado a través del segundo principio de Wardrop (óptimo de sistema).

El submodelo de operadores se formula como un problema de programación matemática, correspondiente a un modelo de asignación de equilibrio con costos marginales de operación (óptimo de sistema) y demanda fija. La red individual de cada operador es considerada en forma completa y detallada para la definición del problema de asignación equivalente; en la Figura 4. se muestra una representación de las características de las redes usadas en los submodelos de despachadores y operadores. Los dos submodelos son resueltos mediante un algoritmo del tipo Frank-Wolfe (LeBlanc et al., 1975) utilizando procedimientos de diagonalización (Fernández y Friesz, 1983) para tratar las interacciones entre distintos productos.

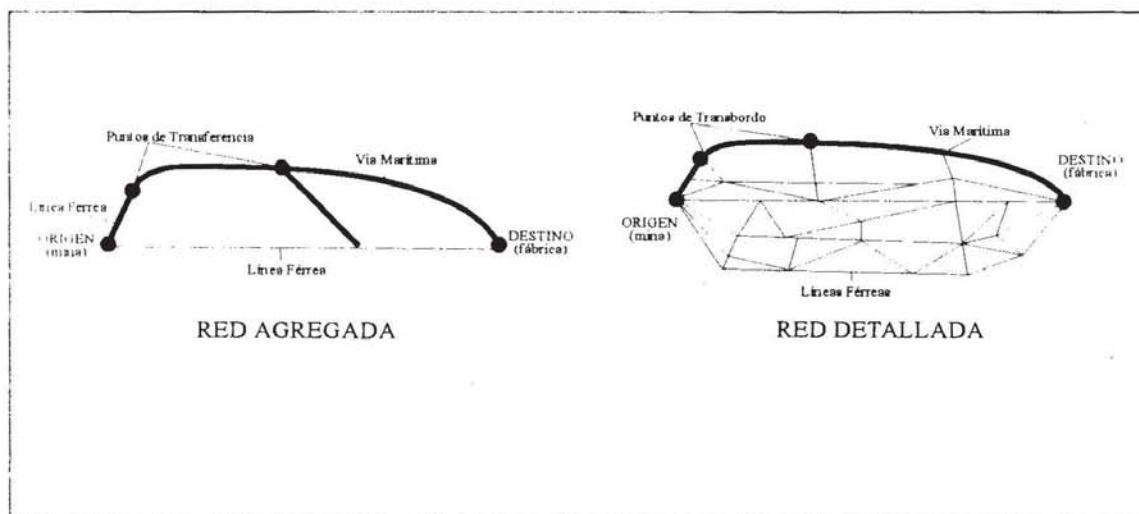


Figura 4. Redes usadas en FNEM



Los flujos de retorno de vehículos vacíos son considerados en forma indirecta mediante ajustes de las funciones de costos y demoras.

Es importante hacer notar que FNEM no está restringido a trabajar con funciones de costos y demoras que sean estrictamente crecientes, como en el caso de los modelos urbanos de redes de transporte. Sin embargo, si se utilizan funciones decrecientes, para representar la existencia de economías de escala o de densidad de flujos, las funciones objetivo de los submodelos de despachadores y operadores pueden resultar no convexas, lo que ocasionará la posibilidad de obtener múltiples soluciones correspondientes a óptimos locales de los problemas de programación correspondientes. Cuando esto ocurre, el mismo algoritmo de Frank-Wolfe puede usarse para obtener una solución, pero debe tenerse cuidado en la elección del paso de avance de la segunda etapa del algoritmo, a fin de garantizar la obtención de un óptimo local. Avriel (1976) provee detalles respecto de varias reglas de selección, que pueden ser usadas para garantizar la convergencia del algoritmo a un óptimo local, cuando la función objetivo no es convexa.

Se han realizado extensivas pruebas de validación de este modelo aplicándolo a la red de transporte interurbano de carga de Estados Unidos (Friesz, Gottfried y Morlok, 1983) y los resultados indican que su capacidad de predicción es substancialmente superior que la de los modelos anteriores (ver sección 2).

4.2 El Modelo de Planificación Estratégica para flujos Multimodales Multiproducto de Carga Interurbanos (STAN)

Es también un modelo de redes que considera distintos modos (multimodal) y distintos productos (multiproducto) (Crainic, Florian y Leal, 1990). Fue desarrollado inicialmente por investigadores de la Universidad de Montreal y es actualmente comercializado a través de la empresa canadiense INRO Consultants Inc.

La demanda es determinada exógenamente y se expresa en la forma de matrices de viajes O-D para cada producto considerado. Para ello, el paquete computacional con que STAN es comercializado permite implementar un procedimiento de cálculo y balanceo de matrices; también es posible importar los resultados de un modelo Insumo-Producto, si es que este se encuentra disponible. Además, se debe especificar el modo o conjunto de modos posibles de ser utilizados por cada producto y por lo tanto, puede ser usado en forma integrada con modelos econométricos de demanda. El énfasis de la modelación está en la simulación de las operaciones sobre la red (infraestructura).

En STAN un **producto** representa a un conjunto de bienes o pasajeros, que demandan servicios de transporte y en consecuencia generan flujos sobre la infraestructura disponible. Cada producto es definido por un conjunto de características que describen sus atributos físicos y la forma en que es transportado, tal como la especificación del tipo de vehículo requerido para su transporte en cada modo usado.

Un **modo** es un medio de transporte que permite mover productos y posee determinadas características operacionales y de costos. Los modos se diferencian también por el tipo de infraestructura que utilizan, sin embargo, el modo involucra un concepto más amplio que puede ser usado para modelar un espectro de posibilidades. Los modos pueden ser usados para modelar diferentes tipos de tracción (ej. diesel y eléctrica en el caso ferroviario) o de vía (normal, de montaña



etc.) o ámbito de operación (navegación costera u oceánica). También se pueden identificar diferencias geográficas y de tipo de administración mediante una adecuada especificación de los modos. Para cada modo se define un vehículo típico en términos de su peso muerto y capacidad de transporte, así como largo o composición cuando corresponda (tren, convoy, camión multi-trailer, etc.).

La **red base** está compuesta por un conjunto de nodos, arcos y modos que representan todos los movimientos posibles sobre la infraestructura disponible. Cada **arco** es identificado mediante tres parámetros: el nodo cabeza, el nodo cola y el modo al que el arco pertenece; si existe más de un modo disponible para transportar un producto entre dos nodos adyacentes, éstos se representan mediante arcos paralelos. En esta forma, el modo es una parte integral de la red y no solo un atributo de los arcos. La definición de cada arco mediante tres parámetros es importante para evitar dificultades con la aplicación de algoritmos de redes (ej. rutas mínimas).

Los **nodos** representan localizaciones físicas en el espacio analizado (ciudades, puertos, patios de carga, interlíneas, etc.). Existen dos tipos de nodos que juegan un rol especial en la red: los centroides y los nodos de transferencia intermodal. Estos últimos deben ser asociados con las funciones de costo y de demoras apropiadas, lo cual puede requerir una expansión mediante su reemplazo por varios nodos y arcos especiales, que formen un grafo bipartito. Los centroides a su vez, tienen asociados generaciones y atracciones de viajes y se unen a la red mediante arcos denominados conectores, los que pueden usarse para modelar los puntos de entrada de los productos en las zonas.

Los **flujos** son las principales variables del modelo. Estos son expresados en dos formas diferentes: i) en términos de una unidad común de medida, normalmente toneladas, lo que permite asegurar la compatibilidad entre diferentes modos mediante una modelación uniforme del flujo a través de toda la red y ii) en términos del número de vehículos necesarios para transportar el flujo asignado a cada arco de la red, a fin de realizar un cálculo realista de los costos de operación sobre la infraestructura y las demoras derivadas de la congestión producida.

La **congestión** tiene una influencia muy importante en los niveles de servicio finalmente obtenidos. El modelo considera funciones flujo-demora que afectan tanto a los tiempos de viaje, como a los costos de transporte; estas pueden ser calibradas como funciones no lineales, que en principio pueden ser no-convexas y asimétricas, en términos de la consideración de los efectos cruzados de congestión, producidos por el transporte de diferentes productos.

Se define una función de costo generalizado sobre cada elemento de la red multimodal, como una suma ponderada de una función de costos de operación, una función de tiempo de viaje (demora) y una función de consumo de energía; los ponderadores de cada uno de estos términos son parámetros que indican la importancia relativa de cada uno de los componentes considerados. En casos particulares es posible dar valor cero a algunos de estos parámetros, a fin de usar un criterio especial de análisis; en otros casos, los pesos relativos de cada componente pueden calibrarse para reflejar diferentes prioridades o políticas. El uso de STAN no impone ninguna regla especial para la elección de los elementos de costo a considerar (tracción, mantención, personal, combustibles, lubricantes etc.), sin embargo los mismos elementos debieran incluirse para todos los modos y en las mismas unidades.



El modelo STAN es formulado matemáticamente como un problema de optimización no lineal, correspondiente a la forma general de un modelo de asignación a redes multimodales y multiproducto. La función objetivo es minimizar el costo total generalizado del sistema y las restricciones corresponden a continuidad de flujos y nonnegatividad; por lo tanto, la solución producida corresponde a un equilibrio de sistema. En este sentido es más simplista y menos sofisticado que FNEM, el que simula explícitamente el comportamiento de los principales agentes y sus interacciones. La flexibilidad y generalidad en la formulación y consideración de las funciones de costo, es fundamental en STAN para contrarrestar las limitaciones que puede imponer el enfoque de minimización de costos, ya que en una gran cantidad de situaciones a nivel micro-operacional, la forma en que los productos son transportados está en gran medida determinada por un conjunto de circunstancias restrictivas de carácter físico y de costos.

La obtención de soluciones numéricas se logra mediante la aplicación de un algoritmo del tipo gradiente (Frank-Wolfe), el que, a fin de evitar problemas de dimensionalidad, usa un enfoque de descomposición por producto.

5. DESARROLLOS FUTUROS

Los análisis de las secciones anteriores permiten concluir que los modelos existentes presentan todavía algunas limitaciones en los siguientes aspectos importantes:

1. Interacciones despachadores operadores. Aún los modelos más avanzados que consideran en la modelación los principales agentes que intervienen en el sistema en la realidad, realizan una modelación secuencial de las decisiones de los despachadores y operadores. Sin embargo, solo una modelación simultánea (determinación simultánea y consistente de las decisiones de todos los agentes interactuantes) asegura la obtención de una solución única y consistente.

Harker y Friesz (1985, 1986a, 1986b) muestran que, si se supone una interacción del tipo Cournot-Nash entre despachadores y operadores, es posible formular el problema de equilibrio conjunto con una sola desigualdad variacional; además, bajo ciertos supuestos, es posible usar una combinación de algoritmos de linearización (gradiente), relajación y diagonalización, para resolver dicha desigualdad variacional. Los subproblemas que se obtienen como consecuencia de la aplicación de diagonalización, pueden ser expresados como problemas de optimización y resueltos mediante la aplicación del bien conocido algoritmo de Frank-Wolfe y otros algoritmos estándar.

2. Equilibrio parcial vs. Equilibrio general. Los modelos existentes usan como datos los precios que los productos a ser transportados tienen en distintas localizaciones del espacio. Por lo tanto, no toman en cuenta las interacciones que existen entre el equilibrio del mercado de los productos, que son objeto de transporte (y que determina los precios finales de estos) y el equilibrio del mercado de transporte que determina las cantidades transportadas y los niveles de servicios y costos experimentados. A fin de obtener un resultado consistente entre ambos mercados es preciso realizar un tratamiento simultáneo que considere las interacciones que entre ellos existen.



Como se mencionó en la sección 3., Tobin y Friesz (1983) y Friesz et al., (1983b), muestran que el concepto tradicional de "problema de equilibrio espacial de precios", puede ser extendido con la consideración de redes de transporte que incluyan explícitamente funciones de costos, demanda y oferta no lineales. La formulación típica del problema de equilibrio espacial de precios (ver sección 3.), no incluye explícitamente funciones de demanda por servicios de transporte, sino que las considera en forma implícita, derivando las cantidades de servicios demandados, como consecuencia de las características de producción y consumo en mercados espacialmente separados.

En consecuencia, debiera ser posible usar un modelo de equilibrio espacial de precios para reemplazar el submodelo de despachadores incluido en FNEM, con lo que este se convierte en un modelo con generación variable y endógena. En tal caso, el resultado obtenido entrega simultáneamente, tanto las condiciones de equilibrio sobre el mercado de transporte (flujos y niveles de servicio), como los precios de equilibrio de los productos transportados, en cada localización espacial considerada; es decir, se obtiene lo que se denomina un equilibrio general. Tal formulación, con generación endógena fue propuesta por Harker y Friesz (1985, 1986a, 1986b) y da origen a lo que Harker (1987) denomina Modelo Generalizado de Equilibrio Espacial de Precios (GSPEM).

3. Monotonidad de las Funciones de Costos. En el caso de sistemas de transporte de carga existen funciones de costos (ej. en el modo ferroviario) que pueden decrecer en un comienzo, debido a la presencia de economías de escala y crecer posteriormente, debido a la aparición de congestión cuando el flujo se aproxima a la capacidad (Morlok, 1978); dichas funciones no son monótonas lo que produce formulaciones no convexas, que tratan de evitarse en la mayoría de los modelos dado que generan múltiples soluciones (óptimos locales).

4. Consideración de Vehículos Vacíos. Se refiere a la necesidad de modelar adecuadamente los flujos de los vehículos (carros, camiones, barcazas, etc.), que una vez realizada una operación de transporte deben ser retornados vacíos a su lugar de origen, para recomenzar el ciclo de operación. Existen dos impactos de estos vehículos que debieran ser considerados: i) los flujos de retorno de vehículos vacíos producen congestión que afectan a los costos de operación de los demás vehículos ii) la disponibilidad de vehículos vacíos en el origen, en el momento necesario, define la capacidad de transporte desde dicho punto del espacio, en el modo respectivo (Solo el modelo STAN incluye explícitamente este tipo de restricción).

5. Consideración de Estrategias de Operación. En la operación ferroviaria se usan trenes de distinta longitud, compuestos de distintos tipos de carros que son agrupados en bloques que poseen el mismo o similares destinos. Este fenómeno tiene una importante influencia en la correcta modelación de la operación de los patios ferroviarios de clasificación y por lo tanto sería beneficioso considerarlo en los modelos.

6. Competencia Imperfecta. En la práctica el mercado de transporte se aleja comúnmente de presentar condiciones de competencia perfecta, dada la posibilidad e incentivos que existen para que haya colusión entre operadores en la negociación de tarifas con los despachadores. Ninguno de los modelos existentes considera esta posibilidad y por lo tanto este es otro aspecto que puede ser mejorado.



AGRADECIMIENTOS

La presente investigación ha sido parcialmente financiada por FONDECYT-Chile y la Pontificia Universidad Católica de Chile.

REFERENCIAS

- Avriel, M. (1976). Nonlinear Programming: Analysis and Methods. **Prentice-Hall**, Englewood Cliffs, N.J.
- Beckmann, M.L., McGuire, C.B. y Winsten, C.B. (1956). Studies in the Economics of Transportation. **Yale University Press**, New Haven, CT.
- Bronzini, M.S. (1980a). **Evolution of a Multimodal Freight Transportation Network Model**. Mimeo, University of Tennessee, Knoxville.
- Bronzini, M.S. (1980b). **Freight Transportation Energy Use**. Report N° DOT-TSC-OST-79-1, vols. 1 and 2, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.
- Bronzini, M.S. (1980c). Evolution of a Multimodal Freight Transportation Network Model. **Proceedings of the Transportation Research Forum**, 21, N° 1:475-85.
- Bronzini, M.S. y Sherman, D. (1983). The Rail-Carrier Route Choice Model. **Transportation Research**, 17A. N° 6:463-69.
- CACI, INC. (1980). **Transportation Flow Analysis: The National Energy Transportation Study (NETS)**. 3 vols. Report N° DOT-OST-P-10-(29-32), U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.
- Cournot, A.A. (1838). **Mathematical Principles of the Theory of Wealth**. Translated by N.T. Bacon, Kelley, New York, NY.
- Crainic, T.G., Florian, M. y Leal, J.E. (1990). A model for Strategic Planning of National Freight Transportation by Rail. **Transportation Science**, 24(1), 1-24.
- Enke, S. (1951). Equilibrium Among Spatially Separated Markets: Solution by Electric Analogue. **Econometrica** 19, 40-47.
- Fernández, J.E. y Friesz, T.L. (1983). Equilibrium Predictions in Transportation Markets: The State of the Art. **Transportation Research** 17B. N° 2:155-72.
- Florian, M. y Los, M. (1982). A New Look at Static Spatial Price Equilibrium Models. **Regional Science and Urban Econ.** 12, 579-597.



Friesz, T.L., Tobin, R.L. y Harker, P.T. (1981). **Variational Inequalities and Convergence of Diagonalization Methods for Derived Demand Network Equilibrium Problems.** Report CUE-FNEM-1981-10-1, Dept. of Civil Engineering, University of Pennsylvania, October.

Friesz, T.L., Gottfried, J.A. y Morlok, E.K. (1983). A Sequential Shipper-Carrier Network Model for Predicting Freight Flows. **Transportation Science**, 20(2), 80-91.

Friesz, T.L., et al (1983b). A nonlinear Complementary Formulation and Solution Procedure for the General Derived Demand Network Equilibrium Problem. **Journal of Regional Science**, 23(3), 337-359.

Friesz, T.L., Westin, L. y Zhong-Gui Sou (1993) A Spatial Computable General Equilibrium Model. **Umea Economic Studies** N° 330, University of Umea, ISSN 0348-1018.

Harker, P.T. (1985a). The Spatial Price Equilibrium Problem with Path Variables. **Socio-Econ. Planning Sci.**, forthcoming.

Harker, P.T. (1987). Predicting Intercity Freight Flows. **Topics in Transportation**, M. Florian Editor. **VNV Science Press**, Utretch, The Netherlands.

Harker, P.T. y Friesz, T.L. (1985). The Use of Equilibrium Network Models in Logistics Management: with application to the U.S. Coal Industry, **Transp. Res.** 19B(5), 457-470.

Harker, P.T. y Friesz, T.L. (1986a). Prediction of Intercity Freight Flows, I: Theory, **Transp. Res.** 20B(2), 139-153.

Harker, P.T. y Friesz, T.L. (1986b). Prediction of Intercity Freight Flows, II: Mathematical Formulation, **Transp. Res.** 20B(2), 139-153.

Isard, W. (1975). **Introduction to Regional Science.** Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.

Kornhauser, A.L., Hornung, M., Harzony, Y., y Lutin J. (1979). The Princeton Railroad Network Model: Application of Computer Graphics in the Analysis of a Changing Industry. Presented at the 1979 Harvard Graphics Conference. **Transportation Program**, Princeton University, Princeton, N.J.

Kresge, D.T. y Roberts, P.O. (1971). Systems Analysis and Simulation Models. Vol. II of **Techniques of Transport**, Meyer, J.D. (Ed.). The Brookings Institute, Washington, D.C.

Lansdowne, Z.F. (1981). Rail Freight Traffic Assignment. **Transportation Research**, 15A:183-90.

LeBlanc, L.J., Morlok, E.K. y Pierskalla, W.P. (1975) An Efficient Approach to Solving the Road Network Equilibrium Traffic Assignment Problem. **Transp. Res.** 9, 309-318.



- Peterson, E.R. y Fullerton, H.V., eds. (1975). **The Railcar Network Models**. Report N° 75-11, Canadian Institute of Guided Ground Transport. Queen's University, Kingston, Ontario.
- Roberts, P.O. (1966). **Transport Planning: Models for Developing Countries**. Unpublished Ph.D. dissertation, Northwestern University.
- Samuelson, P.A. (1952). Spatial Price Equilibrium and Linear Programming. **American Econ. Rev.** 42, 283-303.
- Takayama, T. y Judge, G.G. (1964a). Equilibrium Among Spatially Separated Markets: A Reformulation. **Econometrica** 32, 510-524.
- Takayama, T. y Judge, G.G. (1971). Spatial and Temporal Price and Allocation Models. **North-Holland/American Elsevier Pub. Co.**, New York, NY.
- Tobin, T.L. y Friesz, T.L. (1983). Formulating and Solving the Derived Demand Network Equilibrium Problem in Terms of Arc Variables. **J. of Reg. Sci.** 23, 187-198.

