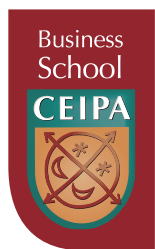


No - 18 Agosto 2017



# LUPA

## EMPRESARIAL

- Y los **egresados CEIPA** ¿qué?
- Artisanal colombian coffees the third wave**
- Impactos locales de la integración energética:**  
el Proyecto Hidroeléctrico Yacyretá
- Métodos exactos y heurísticos en la solución de problemas de redes de transporte en las cadenas de suministros**
- Universidades corporativas,**  
un tema necesario de abordar desde el entorno académico

ISSN: 1900-2459

# Métodos exactos y heurísticos en la solución de problemas de redes de transporte en las cadenas de suministros

# Exact and heuristic methods in solving problems of transport network in supply chains

JUAN MIGUEL COGOLLO FLÓREZ

Magíster en Ingeniería Administrativa, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Profesor Institución Universitaria Ceipa, Medellín, [jmcogollof@unal.edu.co](mailto:jmcogollof@unal.edu.co), [juan.cogollo@ceipa.edu.co](mailto:juan.cogollo@ceipa.edu.co)

## RESUMEN

En este artículo se hace un análisis del problema de las redes de transporte en las cadenas de suministro, considerando sus limitaciones y restricciones y las soluciones de optimización dadas usando métodos exactos y heurísticos. Se describen los tipos de transporte más utilizados, los criterios de selección correspondientes y los diversos actores involucrados en las cadenas de suministro. Luego, se exponen los diferentes sistemas de distribución física y los métodos exactos y heurísticos más utilizados en la solución de problemas de transporte de productos.

**Palabras clave:** distribución, transporte, diseño, rutas, métodos exactos, heurísticos,

## ABSTRACT

The problem of distribution networks in supply chains considering its limitations and constrains is treated in this paper. The most used types of transportation, selection criteria and the various members involved in supply chains are described. Then, different physical distribution systems and exact and heuristic methods used in solving problems of transportation of products are presented.

**keywords:** distribution, transportation, design, routes, exact methods, heuristics.

# 1. INTRODUCCIÓN

La operación de las redes de transporte determina la eficiencia del flujo de los productos en la cadena de suministro. El uso de técnicas y principios de gestión mejora la carga en movimiento, la velocidad de envío, la calidad del servicio, los costos operativos, el uso de instalaciones y el ahorro de energía.

El papel que el sistema de transporte juega en el sistema logístico involucra más que el hecho de llevar los productos hasta los clientes. Por medio de sistemas de transporte bien implementados, los productos pueden ser enviados al lugar correcto y en el momento correcto para satisfacer los clientes, incrementando la eficiencia y construyendo un puente entre productores y consumidores. Por ello, el transporte es la base de la eficiencia y economía del negocio y soporta otras funciones del sistema logístico. Adicionalmente, un buen desempeño del sistema de transporte en las actividades logísticas aumenta no solo la calidad del servicio sino, también, la competitividad de la empresa.

La dinámica de los negocios modernos exige una rápida capacidad de cambio y adaptación al entorno para enfrentar los nuevos retos y exigencias de un mercado globalizado en cuanto a tiempos de entrega más cortos y calidad del servicio. Es por esto que el diseño de redes de transporte en cadenas de suministro debe tener un enfoque global donde se consideren todos los agentes, limitaciones, restricciones y demás características propias del sistema que garanticen una adecuada toma de decisiones, buscando adaptar los criterios de optimización a la realidad propia de la cadena de suministros.

Por ello, en este artículo se hace un análisis del problema de las redes de transporte en las cadenas de suministro desde el punto de vista de sus limitaciones y restricciones y las soluciones de optimización que se han dado usando métodos exactos y heurísticos.

# 2. REDES DE TRANSPORTE EN CADENAS DE SUMINISTRO

El sistema de transporte es la actividad económica más importante de todos los componentes del sistema logístico de la empresa y sus gastos son representativos comparados con las ventas y los costos logísticos totales. Tseng et al (2005) consideran que los costos de transporte representan, aproximadamente, el 6.5% de las ventas y el 44% de los costos logísticos totales en una empresa con sistema de distribución propio. Obviamente, estos porcentajes varían de una empresa a otra dependiendo del valor y tipo de producto, particularidades de las operaciones, aspectos geográficos, entre otros. Por ello, el modo de transporte seleccionado depende de las características de la mercancía, costo del sistema y las condiciones específicas requeridas por el sistema de distribución.

## 2.1 Tipos de transporte

Los sistemas de transporte incluyen cinco modalidades básicas: marítimo, ferroviario, camión, aéreo y por ductos. Estas modalidades se pueden usar en forma combinada, pueden ser propias o suministradas por un operador especializado. La red de transporte resultante debe ser producto de balancear indicadores de la calidad del servicio con los costos del mismo.

### 2.1.1 Ferrocarril

Es un transporte de larga distancia y baja velocidad para materias primas (carbón, madera o químicos) y productos manufacturados de bajo valor (alimentos, papel, madera) donde se prefiere desplazar tamaños de envío de al menos un vagón completo. La relativa baja velocidad refleja el hecho de que la mayor parte del tiempo se destina a operaciones de carga y descarga, desplazamiento interno en las terminales, clasificación y ensamblado de vagones. Los trenes ofrecen una variedad de servicios exclusivos al consignatario como vagones especiales para productos refrigerados, privilegio de varias paradas para descarga parcial, entre otros.

### 2.1.2 Camión

Es un servicio de transporte de productos semiterminados y terminados con una longitud de carga promedio de recorrido de 1150 Km para camiones pequeños y de 460 Km para camiones de carga grandes (Ballou, 2004). Las ventajas del transporte por camión son su servicio puerta a puerta, eliminando manejo intermedio de la mercancía, como sucede generalmente para las modalidades por ferrocarril y avión. Los camiones no pueden manejar todos los tipos de carga en comparación con el tren, debido a las restricciones de seguridad en las autopistas.

### 2.1.3 Avión

El transporte aéreo es considerado para el manejo de mercancías por su rapidez, especialmente en largas distancias, aunque sus tarifas exceden ampliamente a las del transporte por camión o por ferrocarril. La confiabilidad y disponibilidad del servicio aéreo pueden clasificarse como buenas bajo condiciones normales de operación. La variabilidad del tiempo de entrega es baja, en magnitud absoluta, aunque el servicio aéreo es muy sensible a desperfectos mecánicos, condiciones atmosféricas y congestión de tráfico.

### 2.1.4 Barco

El transporte en barcos se utiliza para todo tipo de mercancías, líquidos (buques cargueros) y productos a granel. La carga se mueve, generalmente, en contenedores para reducir el tiempo de manejo y reducir las pérdidas o daños. Los costos por pérdidas o daños por transporte en barco se consideran bajos en comparación con los otros modos y las pérdidas por retraso no son graves porque, generalmente, se trata de mercancías de las cuales los clientes poseen grandes inventarios.

## 2.1.5 Ductos

El transporte por ductos ofrece un rango limitado de servicios y capacidades. El petróleo crudo y sus productos refinados son los productos que más se adecúan de manera más económica a transportarse por ductos. La velocidad de desplazamiento en los ductos es muy lenta, pero los productos se mueven las 24 horas del día. El servicio de ductos es el más confiable en cuanto a tiempo de tránsito debido a que existen pocas interrupciones que causen su variabilidad.

## 2.2 Criterios de selección de modos de transporte

La selección del modo de transporte a utilizar es una de las principales decisiones que se deben tomar en el diseño de las redes de transporte. Para lo cual debe tenerse en cuenta el tamaño del envío, ubicación de los orígenes y destinos, la topografía, requisitos específicos del producto a transportar (mantenimiento de cadenas de frío, condiciones de seguridad, entre otros). Otros factores con gran peso al momento de tomar la decisión de qué modo de transporte utilizar son los siguientes:

- **Precio:** las comparaciones de costo para la selección del modo de transporte deben hacerse con base en los costos reales de la mercancía enviada, la distancia y la dirección del desplazamiento. Generalmente, el transporte aéreo es el más costoso, seguido por el transporte por carretera en camiones, el transporte por ferrocarril, el transporte por ductos y, finalmente, el transporte marítimo que es el menos costoso de todos (Ballou, 2004).
- **Tiempo de tránsito y variabilidad:** para efectos comparativos del desempeño del transporte, es mejor medir el tiempo de tránsito puerta a puerta. La variabilidad se refiere a diferencias ordinarias que ocurren en los envíos por diferentes modalidades y es una medida de la incertidumbre en el desempeño del transportador. El ferrocarril tiene la variabilidad de tiempo de entrega más alta y el transporte aéreo tiene la más baja, con el servicio de camión entre estos dos extremos
- **Pérdidas y daños:** la experiencia en pérdidas y daños es un factor importante en la selección del transportador. Los envíos demorados o bienes que llegan en mal estado ocasionan problemas al cliente o costos de inventario más altos.

Además de los aspectos anteriores, Chopra (2003) establece que en el diseño de una red de transporte en sistemas de distribución, se deben considerar los siguientes factores: tiempo de respuesta, variedad de producto, disponibilidad de producto, experiencia o vivencia del cliente, trazabilidad del pedido y manejo de devoluciones de clientes.

## 2.3 Actores involucrados

- **Emisores:** empresa origen de la mercancía y encargada de la gestión del proceso de transporte.
- **Transportadores:** este término se refiere a las empresas legalmente constituidas o particulares que se encargan de realizar el proceso de transporte de bienes.
- **Receptores:** constituidos por empresas, centros de distribución, bodegas e instalaciones en general que reciben los productos transportados.
- **Residentes:** personas que se ven afectadas o interactúan con las instalaciones o vías que hacen parte de la red de transporte.
- **Gobierno:** autoridades locales, regionales o nacionales cuya esfera de actuación afecte el funcionamiento de las redes de transporte.

## 2.4 Diseño de la red de transporte

El diseño e implementación de una red de transporte (Figura 1) es un proceso sistemático que requiere de una descripción inicial de un problema asociado, generalmente, con la definición de rutas y unos objetivos de desempeño, los cuales tienen ciertas limitaciones y restricciones para su cumplimiento. Luego, se recopilan datos que permitan obtener información para caracterizar la red y definir las alternativas de solución viables al problema original para, más adelante, plantear modelos que describan el movimiento del producto y estimen el resultado de cada alternativa. La evaluación de los modelos se realiza contrastando sus resultados cuantitativos y cualitativos con los objetivos propuestos, arrojando un primer acercamiento a la mejor alternativa, la cual se determina finalmente mediante un análisis de sensibilidad. Por último se procede a la implementación de la alternativa seleccionada, efectuando simultáneamente una revisión de los resultados obtenidos para realizar las correcciones necesarias sobre el proceso (Muñuzuri et al, 2002).



Figura 1. Procedimiento de diseño e implementación de una red de transporte. Fuente: Muñuzuri et al, 2002.

## 2.5 Sistemas de distribución física

Un sistema de distribución física consta de vehículos, instalaciones fijas, personas y objetos que deben ser distribuidos, donde cada uno de ellos lleva asociado unos costos. Los vehículos incurren en costos de operación y costos de parada (carga y descarga). Las instalaciones fijas soportan el costo del espacio destinado a mantener inventarios y el costo de la carga y descarga inicial y final. Los objetos distribuidos llevan un costo asociado al inventario estacionario y otro asociado al inventario en movimiento (Robusté, 2005).

La estrategia de distribución óptima puede ser de tipo único o una combinación de varias formas de distribución donde se logren armonizar la minimización de costos, los requerimientos específicos de manipulación del producto y las exigencias del consumidor.

### 2.5.1 Distribución directa

La entrega del producto se hace directamente desde el fabricante al consumidor. Se utiliza generalmente en empresas que trabajan sobre pedido. Desde el punto de vista logístico es una situación ideal, ya que evita mantener una infraestructura de almacenes, sin embargo, desde el punto de vista industrial, se requiere un esfuerzo especial para flexibilizar la operación y conseguir tiempos cortos y consistentes de respuesta al cliente.

### 2.5.2 Distribución escalonada

Existen uno o varios almacenes centrales que reciben la producción directamente desde las fábricas o proveedores, que posteriormente la entregan en unos almacenes regionales desde donde se efectúa la distribución final al punto de venta. Se aproxima el producto a los puntos de consumo, pero se necesita mantener una infraestructura costosa de almacenes.

### 2.5.3 Centros de consolidación (operaciones cross-docking)

Se sustituyen los almacenes por plataformas de carga/descarga en las cuales no existe stock almacenado, sino que son instalaciones de tránsito donde se reciben las mercancías ya empacadas con destino al punto de venta.

### 2.5.4 Distribución directa desde almacén central

La distribución se hace desde un almacén central a la red de distribuidores; no existen almacenes periféricos. Es un modelo que solo puede aplicarse cuando no se ponga en riesgo el grado de servicio ni se incremente demasiado el costo de transporte.

### 2.5.5 Planta de distribución

Consta de un centro de distribución que recoge los pedidos desde la red de distribuidores para distribuirlos directamente a los puntos de venta. Implica un servicio ágil de recogida de pedidos, preparación y programación de rutas.

## 2.6 Métodos exactos en diseño de redes de transporte

La investigación científica en el campo logístico ha dedicado en los últimos tiempos un gran esfuerzo al desarrollo de técnicas adecuadas para resolver modelos teóricos de transporte. La escasez creciente de recursos y las restricciones legales y medioambientales características del ambiente empresarial moderno conlleva que en el análisis de este tipo de problemas se deban considerar todas las variables que intervienen teniendo como fin último el aumento de los ingresos con la optimización de los recursos empleados.

### 2.6.1 Múltiples puntos de origen y destino

La existencia de puntos múltiples de origen que sirven a múltiples puntos de destino origina el problema de asignación de los destinos a esos orígenes y definir las mejores rutas entre ellos. A este tipo de problema se aplica con frecuencia una clase especial de algoritmo de programación lineal conocido como método de transporte (Ballou, 2004).

Generalmente, la cantidad de bienes disponibles en cada localidad de suministro (origen) es limitada y se conoce la cantidad de bienes necesarios en cada una de las localidades de demanda (destino). El objetivo normal en un problema de transporte es minimizar el costo de embarcar bienes de los orígenes a los destinos.

#### 2.6.1.1 Modelo de programación lineal general del problema de transporte

La programación lineal es un enfoque de solución de problemas elaborado para ayudar en la toma de decisiones. Se conocía al principio como programación en una estructura lineal, hasta 1948, cuando Tjalling Koopmans sugirió acortar el nombre a programación lineal.

En 1941 se formula por primera vez el problema de transporte, estudiado independientemente por Koopmans y Kantorovitch, razón por la cual se suele conocer con el nombre de problema de Koopmans-Kantorovitch. En 1947, G.B. Dantzig formula, en términos matemáticos muy precisos, el enunciado estándar al que cabe reducir todo problema de programación lineal. Una de las primeras aplicaciones de sus estudios fue el puente aéreo de Berlín. Se continuó con infinidad de aplicaciones de tipo preferentemente militar (Anderson et al, 2006).

Los problemas de programación lineal se caracterizan por tener una sola función objetivo, maximizar o minimizar cantidades; la función objetivo está sujeta a restricciones y, la función objetivo y las restricciones deben ser proporcionales al nivel de desempeño de cada producto.



Para ilustrar el modelo de programación lineal general del problema de transporte (figura 2) se usa la siguiente notación:

$i$  = índice para los orígenes,  $i = 1, 2, \dots, m$

$j$  = índice para los destinos,  $j = 1, 2, \dots, n$

$x_{ij}$  = cantidad de unidades embarcadas del origen  $i$  al destino  $j$

$c_{ij}$  = costo por unidad de embarque del origen  $i$  al destino  $j$

$s_i$  = suministro o capacidad en unidades en el origen  $i$

$d_j$  = demanda en unidades en el destino  $j$

El modelo de programación lineal general del problema de transporte de  $m$  orígenes y  $n$  destinos es:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

Sujeto a

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq s_i \quad i = 1, 2, \dots, m \quad \text{Suministro}$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = d_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad \text{Demanda}$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \text{para toda } i \text{ y } j$$

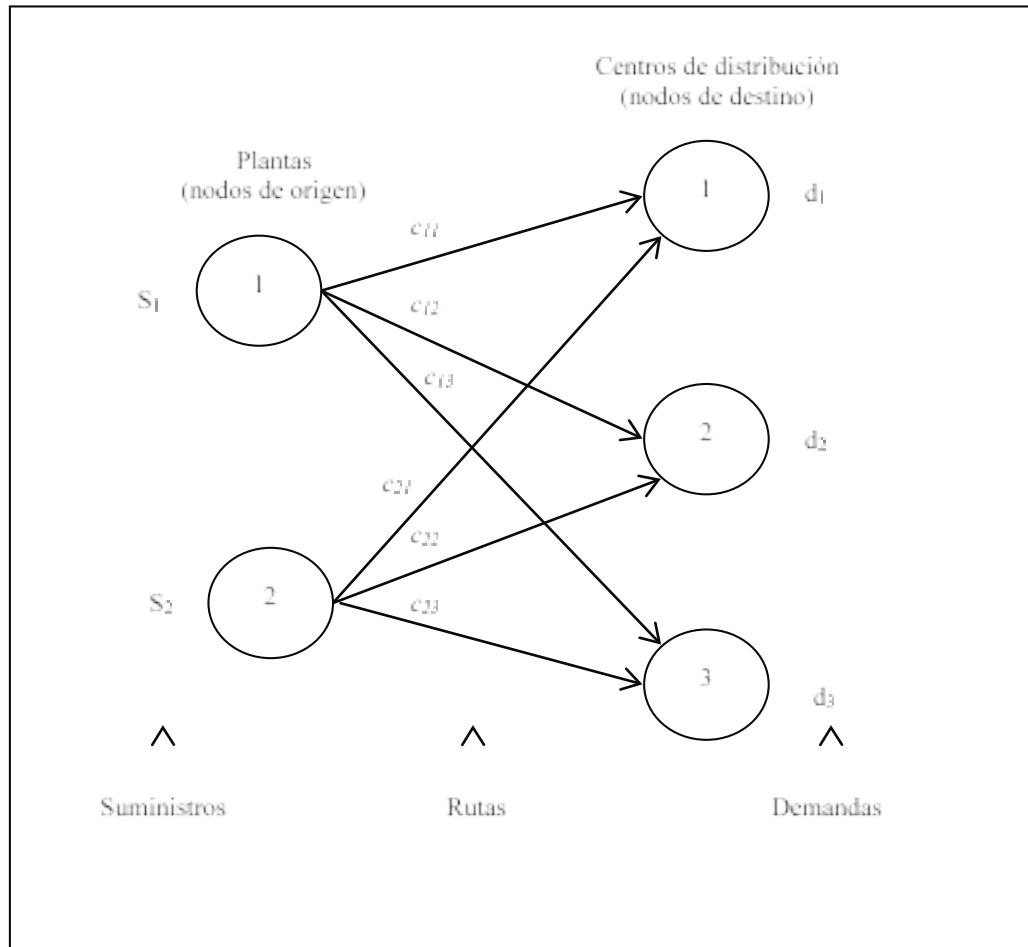


Figura 2. Representación general de red del problema de transporte. Elaboración propia.

Se pueden agregar restricciones de la forma

$$x_{ij} \leq L_{ij}$$

Si la ruta del origen  $i$  al destino  $j$  tiene capacidad  $L_{ij}$ . Un problema de transporte que incluya restricciones de este tipo se conoce como problema de transporte con capacidades.

Igualmente, se pueden agregar restricciones mínimas de ruta de la forma  $x_{ij} \geq M_{ij}$  si la ruta del origen  $i$  al destino  $j$  debe manejar al menos  $M_{ij}$  unidades.

### 2.6.1.2 Modelo de programación lineal general del problema de transbordo

El problema de transbordo es una extensión del problema de transporte en el cual se agregan nodos intermedios, llamados nodos de transbordo, para representar localizaciones como centros de distribución. En este tipo de problema de distribución, pueden hacerse embarques entre cualquier par de los tres tipos generales de nodos: de origen, de transbordo y de destino. Se permite el embarque de bienes de los orígenes a los nodos intermedios y a los de destino, desde un origen a otro origen, desde una localidad intermedia a otra, de una localidad de destino a otra y en forma directa de los orígenes a los destinos (Figura 3).

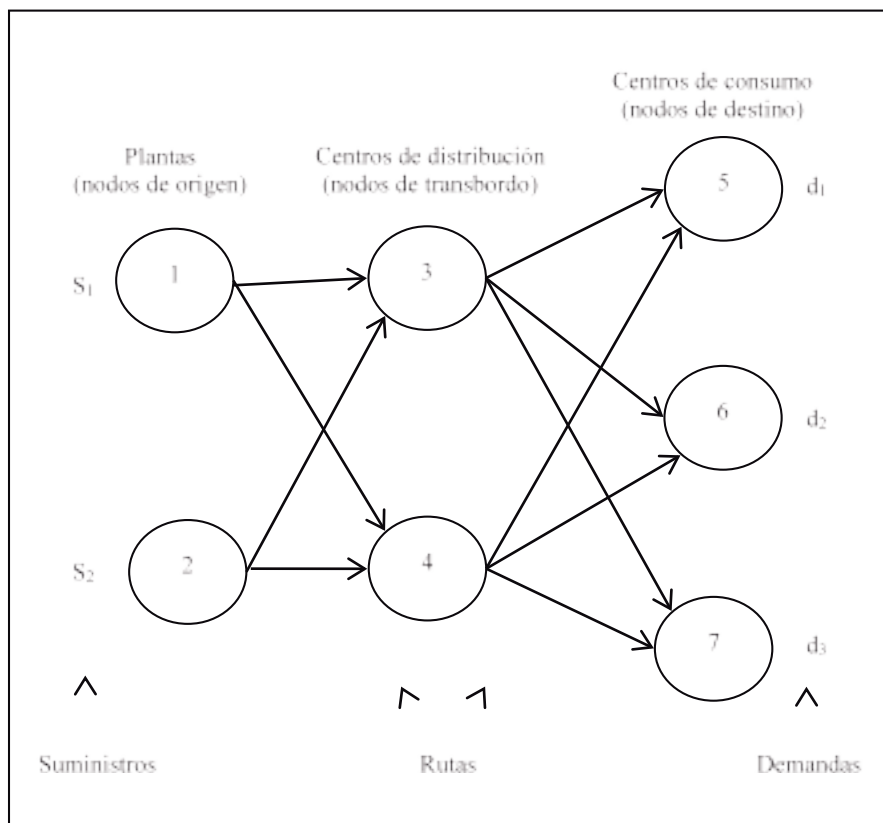


Figura 3. Representación general de red del problema de transbordo. Elaboración propia.

El suministro disponible en cada origen es limitado y se especifica la demanda en cada destino. El objetivo en el problema de transbordo es determinar cuántas unidades deberían embarcarse a lo largo de cada arco en la red de modo que se satisfagan todas las demandas de los destinos con el mínimo costo de transporte posible.

El modelo general de programación lineal del problema de transbordo es:

$$\text{Min} \sum_{\text{todos los arcos}} c_{ij} x_{ij}$$

Sujeto, en los nodos de origen i, a:

$$\sum_{\text{arcos que salen}} x_{ij} - \sum_{\text{arcos que entran}} x_{ij} \leq s_i$$

En los nodos de transbordo a:

$$\sum_{\text{arcos que salen}} x_{ij} - \sum_{\text{arcos que entran}} x_{ij} = 0$$

Y en los nodos de destino j, a:

$$\sum_{\text{arcos que entran}} x_{ij} - \sum_{\text{arcos que salen}} x_{ij} = d_j$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \text{para toda } i \text{ y } j$$

Donde:

$x_{ij}$  = cantidad de unidades embarcadas desde el nodo i hasta el nodo j

$c_{ij}$  = costo por unidad de embarcar desde el nodo i hasta el nodo j

$s_i$  = suministro en el nodo de origen i

$d_j$  = demanda en el nodo de destino j

### 2.6.1.3 Programación lineal entera

Existen problemas que se modelan como programas lineales con el requerimiento adicional de que una o más variables deben ser números enteros, los cuales se llaman programas lineales enteros. Si todas las variables deben ser enteros, se tiene un programa lineal sólo con enteros; si algunas variables, pero no todas, deben ser enteras, se tiene un programa lineal de enteros mixto. En muchas aplicaciones de programación lineal entera se requiere que una o más variables enteras sean igual a 0 o a 1. Dichas variables se llaman binarias.

Las variables enteras proporcionan una flexibilidad de modelamiento considerable, expandiendo la cantidad de aplicaciones que pueden abordarse con la metodología de la programación lineal.

La flexibilidad agregada de modelamiento que brinda la programación con enteros es que los problemas que implican variables enteras con frecuencia son mucho más difíciles de resolver. Un problema de programación lineal con varios miles de variables continuas puede resolverse usando con cualquiera de los solucionadores comerciales de programación lineal. Software comerciales como MPSX-MIP®, OSL®, CPLEX® y LINDO®, tienen una extensa capacidad de programación entera. Los paquetes de hoja de cálculo como Excel® tienen la capacidad de resolver programas enteros más pequeños (Rodríguez, 2007).

Las aplicaciones de la programación entera incluyen la programación de tripulaciones de aeronaves, programación de sistemas de producción, programación de ofertas de descuentos por volumen, ubicación de instalaciones.

En el problema de diseño de sistemas de distribución se pueden utilizar variables 0-1 para elaborar un modelo que permita elegir las mejores ubicaciones de plantas y determinar cuánto embarcar desde cada planta hasta cada centro de distribución. Se pueden definir variables 0-1 para representar la decisión de construcción de la planta:

$y_i = 1$  si se construye la planta; 0 si no se construye.

Las variables que representan la cantidad embarcada desde cada sitio potencial de planta hasta cada centro de distribución se definen del mismo modo que para un problema de transporte:

$x_{ij}$  = unidades embarcadas desde la planta  $i$  al centro de distribución  $j$ .

El costo fijo anual de operar y las restricciones de capacidad de las nuevas plantas se expresan en función de las variables 0-1  $y_i$ , por lo que sólo se calcula para la planta o plantas que se construyen en realidad (esto es,  $y_i = 1$ ). Si no se construye una planta,  $y_i = 0$  y el costo fijo anual correspondiente es \$0.

La función objetivo a minimizar es la suma del costo de transporte más el costo fijo anual de operar las plantas recién construidas. Este modelo básico puede expandirse para acomodar sistemas de distribución que implican embarques directos de plantas a almacenes, de plantas a tiendas de venta al menudeo y productos múltiples (Anderson et al, 2006).

## 2.6.2 Puntos coincidentes de origen y destino

Cuando los vehículos de transporte son de propiedad de la empresa, generalmente, los puntos de origen y destino son los mismos. Tal es el caso de la distribución de bebidas a bares y restaurantes, reparto de alimentos a domicilio, transporte de prisioneros entre cárceles, reparto de correo, entre otros.

Este tipo de problema de diseño de rutas es una extensión del problema de puntos separados de origen y destino, pero el requisito de que la vuelta no está completa hasta que el vehículo regresa a su punto de partida, añade una dimensión que lo complica. Se conoce como problema del agente viajero (TSP, por sus siglas en inglés) y el objetivo es hallar la secuencia en la que los puntos deberían visitarse, de manera que se pueda reducir al máximo el tiempo o la distancia total del recorrido. En la figura 4 se muestra el esquema de una ruta del problema de agente viajero.

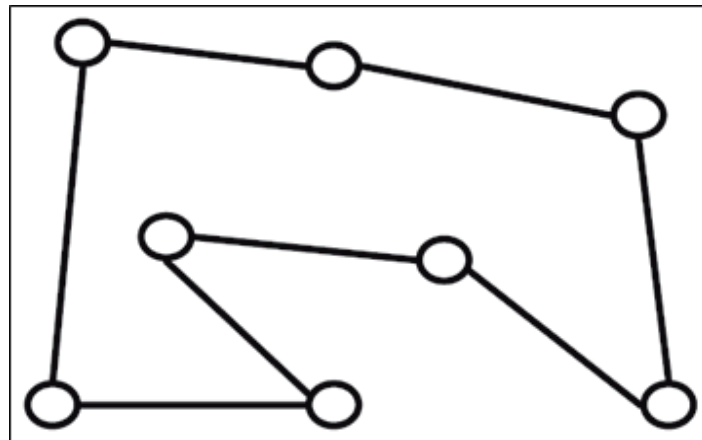


Figura 4. Esquema general de ruta en un Problema del Agente Viajero de ocho ciudades. Fuente: Elaboración propia.

El problema en sí es fácil de formular, sin embargo, es difícil encontrar una solución óptima y probar que sea la mejor solución posible. Esto implica que cada algoritmo existente para su solución tiene un tiempo de ejecución que crece exponencialmente con el tamaño del problema.

A inicios de los 90 del siglo pasado el TSP de mayor tamaño que había sido resuelto era uno de 318 ciudades. Luego se desarrollaron métodos basados en técnicas de ramificación y corte/acotamiento, las cuales explotan muy efectivamente la estructura matemática del problema, que han sido muy exitosas reportando instancias resueltas de hasta 13509 ciudades (González, 1999).

Una aplicación del TSP se da en la logística de distribución de mercancías a los clientes. Generalmente, algunas empresas necesitan distribuir los bienes en un corto tiempo, disponen de un almacén central donde se concentran los bienes a distribuir y una flotilla de unidades de transporte se encarga de visitar a los clientes para hacer la entrega de mercancía. Si la empresa dispone una sola unidad de servicio, el problema de determinar la ruta que debe seguir el vehículo para entregar en el menor tiempo toda la mercancía es exactamente un TSP.

Este problema contiene otros adicionales como determinar cuál es el tamaño ideal de la flota de vehículos, determinar cuáles son los clientes que deben ser asignados a cada unidad de servicio para hacer la entrega y cuál es la ruta que debe seguir cada una de ellas con el fin de terminar con el reparto en el menor tiempo posible. En la figura 5 se ilustra un ejemplo de ruteo de vehículos.

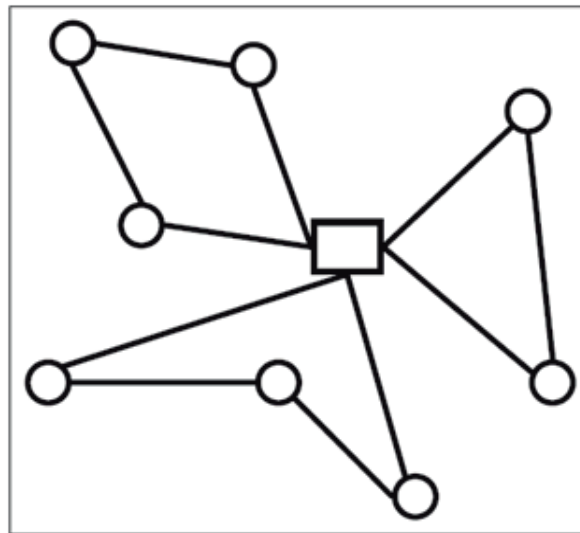


Figura 5. Ejemplo de ruteo de vehículos con una central de abasto, ocho clientes y tres rutas. Elaboración propia.

## 2.7 Métodos heurísticos en diseño de redes de transporte

El uso de sistemas inteligentes en la resolución de problemas de transporte permite un acercamiento a la realidad de los sistemas de distribución introduciendo nuevos conceptos manejando un modelo económico adecuado ante los múltiples escenarios posibles con variables y restricciones reales.

Según el diccionario de la Real Academia Española, la heurística es la “manera de buscar la solución de un problema mediante métodos no rigurosos, como por tanteo, reglas empíricas, etc.” (RAE, 2012). En el ámbito de la informática, una heurística es una regla que permite, frente a un número grande de posibles soluciones parciales, elegir una que supuestamente tiene una mayor probabilidad de contribuir a la solución final del problema, con el objetivo de ahorrar tiempo de procesamiento.

A continuación se exponen los métodos heurísticos más usados para la solución de problemas de redes de transporte en cadenas de suministro.

## 2.7.1 Optimización por colonia de hormigas (ACO)

Esta técnica metaheurística constituye un enfoque a la resolución de problemas de optimización combinatoria. Los algoritmos ACO son modelos inspirados en el comportamiento de colonias de hormigas reales: cómo son capaces de seguir la ruta más corta entre la colonia y una fuente de abastecimiento, en un viaje de ida y regreso. Esto se debe al rastro de feromona que cada una de ellas va dejando a lo largo del camino.

A medida que las hormigas siguen un rastro, van dejando su propia feromona, lo cual hace que la probabilidad de escogencia de un camino sea proporcional al número de hormigas que lo hayan escogido previamente.

El primer algoritmo basado en la optimización mediante colonias de hormigas fue aplicado al Problema del agente viajero (TSP), obteniéndose buenos resultados. A partir de dicho algoritmo se han desarrollado diversos heurísticos que incluyen varias mejoras y han sido aplicados no solo al TSP sino también a problemas como el VRP (Vehicle Routing Problem) (Dorigo y Di Caro, 1999).

Los algoritmos de optimización por colonia de hormigas son procesos iterativos. En cada iteración se "lanza" una colonia de  $m$  hormigas y cada una de las hormigas de la colonia construye una solución al problema. Las hormigas construyen las soluciones de manera probabilística, guiándose por un rastro de feromona artificial y por una información calculada a priori de manera heurística (Barcos et al, 2002).

La regla probabilística para el caso del TSP es:

$$p_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [n_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}(t)]^\alpha [n_{lj}]^\beta} \quad \text{con } j \in N_i^k$$

donde  $p_{ij}^k(t)$  es la probabilidad con la que, en una iteración  $t$  del algoritmo, la hormiga  $k$ , situada actualmente en la ciudad  $i$ , elige a la ciudad  $j$  como próxima parada.  $N_i^k$  es el conjunto de ciudades no visitadas todavía por la hormiga  $k$ .  $\tau_{ij}(t)$  es la cantidad de feromona acumulada sobre el arco  $(i,j)$  de la red en la iteración  $t$ .  $n_{ij}$  es la información heurística para la que, en el caso del TSP, se utiliza la inversa de la distancia existente entre las ciudades  $i$  y  $j$ .  $\alpha$  y  $\beta$  son dos parámetros del algoritmo, los cuales hay que ajustar (Barcos et al, 2002).



Cuando todas las hormigas han construido una solución debe actualizarse la feromona en cada arco. La fórmula a seguir es:

$$\tau_{ij}(t + 1) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}^{\text{best}}$$

$$\Delta\tau_{ij}^{\text{best}} = \begin{cases} \frac{1}{L^{\text{best}}}, & \text{si el arco } (i, j) \text{ pertenece a } T^{\text{best}} \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

donde  $\rho$  es el coeficiente de evaporación de la feromona.  $T^{\text{best}}$  puede ser la mejor solución encontrada hasta el momento o bien la mejor solución encontrada en la iteración.  $L^{\text{best}}$  es la longitud de la solución  $T^{\text{best}}$ .

Se obliga a que el nivel de feromona permanezca en un rango  $[T^{\text{min}}, T^{\text{max}}]$ . Estos límites se imponen con el objetivo de evitar el estancamiento en la búsqueda de soluciones. Toda la feromona se inicializa con  $T^{\text{max}}$ . Tras la actualización de la feromona, puede comenzarse una nueva iteración. El resultado final es la mejor solución encontrada a lo largo de todas las iteraciones realizadas (Barcos et al, 2002).

## 2.7.2 Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos fueron desarrollados por John Holland en la Universidad de Michigan en la década de 1970 y conforman una técnica informática dentro del área de la inteligencia artificial para la resolución de problemas. Un algoritmo genético es una técnica de búsqueda global al azar que resuelve problemas imitando procesos observados en la evolución natural usando poca información heurística sobre el ámbito del problema. Por ello, puede ser aplicado a un amplio rango de problemas poco definidos donde no se aplican métodos especializados. Básicamente, involucra una población de cromosomas, donde cada uno de ellos codifica una solución para un caso particular. Esta evolución se lleva a cabo a través de la aplicación de operadores que imitan el fenómeno natural observado en la naturaleza (reproducción, mutación).

En la solución de problemas de redes de transporte, la representación de cada individuo que compone la población, las estrategias de cruce y mutación, y los diferentes parámetros del algoritmo, difieren según las características propias del VRP a solucionar. Los individuos se codifican con un cromosoma (vector) de 52 genes (componentes), cada uno de los cuales debe contener uno de los nodos que componen el grafo (se excluye el nodo que identifica el origen), en ningún caso pueden existir genes repetidos, ya que esto indicaría que un nodo está siendo visitado más de una vez. La ruta que sigue cada vehículo consiste en partir del origen y visitar consecutivamente los nodos que se indican en el cromosoma hasta llegar a uno cuya demanda, aunada con la de todos los nodos visitados anteriormente por el vehículo, supere su capacidad; cuando esto sucede, el vehículo se dirige al origen y se inicia la ruta del vehículo siguiente.

El tamaño de la población a utilizar en la evolución del algoritmo es un parámetro del mismo y se ajusta por ensayo y error según los resultados obtenidos. El algoritmo se detiene después de realizar un determinado número de generaciones (ciclos); al igual que el tamaño de la población, la condición de terminación es un parámetro del algoritmo y se ajusta por ensayo y error de tal manera que no se limite la evolución del mismo (González y González, 2007).

El costo de cada cromosoma equivale a la suma de los costos de las rutas recorridas por cada uno de los vehículos. Para cada vehículo, el costo de su ruta se calcula con la suma de las distancias recorridas, iniciando con la distancia entre el origen y el primer nodo; posteriormente se suman las distancias entre los pares de nodos consecutivos que aparecen en el cromosoma hasta llegar a aquel que no pueda ser satisfecho con la capacidad del vehículo, en este momento se suma la distancia entre el último nodo visitado y el origen y se inicia el mismo procedimiento para el vehículo siguiente; este proceso se realiza hasta agotar los nodos a visitar. En caso de encontrar individuos que requieran más vehículos para satisfacer la demanda de todos los nodos, el algoritmo se programa para penalizarlo incrementando significativamente el costo de su ruta, de tal manera que se reduzca su probabilidad de reproducirse. Una vez que la población cuenta con su tamaño indicado, el algoritmo realiza una ordenación de los individuos, colocando en primer lugar aquel que posea el mejor *fitness*, es decir, aquella solución que presenta la menor distancia total recorrida para satisfacer la demanda de todos los nodos (Zhou, Min y Gen, 2002).

### **2.7.3 Búsqueda Tabú**

La búsqueda tabú es un procedimiento iterativo y heurístico para resolver problemas discretos de optimización combinatoria y de gran escala. Busca escapar de óptimos locales empleando algunas metodologías como el uso de memorias flexibles. Además, esta técnica impone y relaja restricciones con el fin de explorar áreas prohibidas y de hacer cortes de la región factible, al tener en cuenta las restricciones que la limitan.

La representación de la solución por medio de secuencias o tours, como es necesario para la aplicación de la búsqueda tabú se hace por medio de un único vector en el que se incluyen los clientes visitados por cada vehículo o por el único vehículo para el caso del TSP, donde se incluye el orden en que los clientes son visitados, es decir, que este tour tiene una longitud fija igual al número de clientes. Para el caso del problema de ruteo de vehículos con restricciones de tiempo (TCVRP), en el tour una ruta es identificada porque inicia y finaliza con el depósito, ya que los vehículos deben partir y regresar al depósito; excepción del último tour (último vehículo) que no se coloca el depósito al final del tour porque es algo obvio y se omite en la definición del tour. Como el número de vehículos empleados puede variar, el tamaño del tour no es fijo. De estos tours se obtiene toda la información para el cálculo de la función objetivo, empleando además la tabla de distancia (Acero, 2002).

Se toma como restricción que los clientes que acabaron de ser movidos no puedan ser escogidos nuevamente. El tamaño de la lista tabú es un parámetro de entrada, que debe ser directamente proporcional al número de clientes. El tamaño ideal en cada caso, lo da el análisis de los mismos. Una de las ventajas de la búsqueda tabú es la posibilidad de hacer un recálculo de la función objetivo, sin necesidad de calcular nuevamente la totalidad de la misma; esto disminuye la carga computacional del algoritmo. Esta función de recálculo depende de la estrategia de vecindad empleada, que puede ser mutación, inserción 2OPT, entre otras (González y González, 2007).

## **2.7.4 Redes neuronales**

Las redes neuronales son modelos computacionales compuestos de unidades altamente interconectadas a través de conexiones fuertes, como las neuronas en el cerebro humano: una señal es enviada de unidad a otra a través de una conexión y es modulada a través del peso asociado. Aunque relacionadas superficialmente con su contraparte biológica, las redes neuronales artificiales presentan características relacionadas con el conocimiento humano. En particular, ellas pueden aprender de la experiencia e inducir conceptos generales a partir de ejemplos específicos a través de un ajuste incremental de sus pesos. Recientemente, estos métodos han sido aplicados a problemas combinatorios como el TPS, de cuyas investigaciones se han desarrollado modelos como los de Hopfield-Tank, malla elástica (elastic net, EN) y mapa autoorganizado (self-organizing map, SOM). Los modelos EN y SOM están bastante distante de las redes neuronales clásicas, pero han probado ser más efectivos en el TSP que el modelo de Hopfield-Tank (Potvin, 1998).

La malla elástica y los mapas autoorganizados son plantillas deformables que se ajustan al contorno de los vértices para resolver un TSP. Estas unidades están vinculadas formando un anillo. Empezando con una configuración inicial arbitraria, la localización de cada unidad en el anillo es ajustada incrementalmente hasta que al menos una unidad llega a estar lo suficientemente cerca a cada vértice. Al final, cada vértice es asignado a la unidad más cercana. A través de esta asignación, el orden de las unidades a lo largo del anillo determina el orden de los vértices en el tour TSP. Los modelos EN y SOM trabajan similarmente, pero difieren en los mecanismos usados para controlar la migración de unidades hacia los vértices. Las plantillas deformables pueden ser fácilmente aplicables a problemas geométricos puros como TSP's euclidianos. Sin embargo, no están diseñados para manejar restricciones adicionales como capacidad y tiempos de rutas máximos, las cuales, a menudo, violan la naturaleza geométrica del problema. Una generalización de los modelos dedicados recientemente al tratamiento del TSP y VRP es obtenida usando muchas plantillas deformables, una por cada ruta. Típicamente, los modelos son aplicados con un número creciente de anillos (rutas) hasta identificar una solución factible (Toth, 2002). Dado que se tienen múltiples anillos, se da una competencia entre ellos para conseguir una porción igual de vértices.

## 3. CONCLUSIONES

La configuración de la red de transporte impacta directamente los costos incurridos en inventarios, instalaciones, manejo de materiales y sistemas de información. En la medida que se logre un buen desempeño puede convertirse en una ventaja competitiva; aunque no se le agregue valor al producto como tal, puede aumentar el valor percibido por el cliente respecto al servicio.

La red de distribución debe adaptarse a las características y condiciones propias de la empresa, el producto, los clientes y el resto de integrantes de la cadena de abastecimiento. Por ello, no existe una opción mejor que otra u óptima, todas tienen fortalezas y debilidades y su éxito depende de la asertividad en el momento de evaluar y considerar todos los factores influyentes en el diseño.

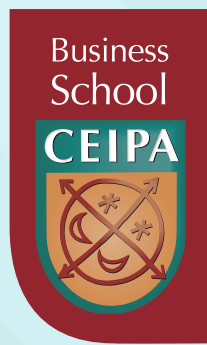
Los problemas de rutas son difícilmente optimizables en situaciones reales por métodos exactos, debido al incremento exponencial del esfuerzo de cálculo necesario en relación con la dimensión del problema. En estos casos, se pueden obtener soluciones satisfactorias en tiempos de cálculo razonables usando métodos metaheurísticos que emulan estrategias eficientes empleadas por la naturaleza y utilizados en inteligencia artificial. El éxito de un método especializado en un modelo teórico concreto no garantiza su adecuación ante escenarios reales complejos propios de los sistemas de transporte

Los métodos heurísticos no son soluciones totales y poseen un margen de error. Sin embargo, son usados permanentemente en la solución de problemas complejos. El mejor de estos métodos puede encontrar soluciones excelentes y, algunas veces, óptimas en casos de ruteo con varios cientos de clientes, aunque con un importante costo del tiempo de cálculo.

Una importante ventaja que presentan las técnicas heurísticas respecto a las técnicas exactas es que, por lo general, brindan una mayor flexibilidad para el manejo de las características del problema. Además, pueden ofrecer más de una solución, lo cual permite ampliar las posibilidades de elección, sobre todo cuando existen factores que no han podido ser añadidos en el modelo, pero que también deben ser considerados.

# REFERENCIAS

- ANDERSON, D.; SWEENEY, D. & WILLIAMS, T. (2006). Métodos cuantitativos para los negocios. 9 ed. Thomson: México, 822 p.
- ACERO, R. (2002). *Aplicación de una heurística de búsqueda tabú en un problema de programación de tareas en línea flexible de manufactura*. Tesis de Maestría (Magister en Ingeniería Industrial). Universidad de los Andes. Bogotá.
- BALLOU, R. (2004). Logística, administración de la cadena de suministro. 5 ed. México: Prentice Hall.
- BARCOS, L.; RODRÍGUEZ, V.; ÁLVAREZ, M. & ROBUSTÉ, F. (2002). Algoritmo basado en la optimización mediante colonias de hormigas para la resolución del problema del transporte de carga desde varios orígenes a varios destinos. En: V Congreso de Ingeniería del Transporte. Universidad de Navarra, España.
- CHOPRA, S. (2003). Designing the distribution network in a supply chain. *Transportation Research Part E*, 39, 123-140
- DORIGO, M. & DI CARO, G. (1999). Ant algorithms for discrete optimization. *Artificial Life*, 5, 137-172.
- GONZÁLEZ, J. (1999). Aplicación del TSP en problemas de manufactura y logística. En: *Revista Ingenierías UANL*, 2 (mayo-agosto), 18 - 23.
- GONZÁLEZ, G. & GONZÁLEZ, F. (2007). Metaheurísticas aplicadas al ruteo de vehículos. Un caso de estudio. Parte 2: algoritmo genético, comparación con una solución heurística. *Revista Ingeniería e Investigación*, 27 (1), 149-157.
- MUÑUZURI, J.; LARRAÑETA, J. & MUÑOZ, C. (2002). La logística urbana de mercancías: soluciones, modelado y evaluación. En: *II Conferencia de Ingeniería de Organización*. Vigo. pp. 597-604.
- POTVIN, J. (1998). The traveling salesman problem: a neural network perspective. *Journal on computing*, 5, 328-348.
- REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. Diccionario de la lengua española. 22 ed. Recuperado el 18 de septiembre de 2012 de <http://lema.rae.es/drae/?val=heuristica>.
- ROBUSTÉ, F. (2005). *Logística del transporte*. 2 ed. Barcelona: UPC.
- RODRIGUEZ, A. (2007). Hacia la optimización del transporte. En: *Primer Congreso de Logística y Gestión de la Cadena de Suministro*. Zaragoza. Universidad Politécnica de Valencia.
- TOTH, P. (2002). *The vehicle routing problem*. Philadelphia: SIAM, 367 P.
- TSENG, Y-Y; TAYLOR, M. & YUE, W-L. (2005). The role of transportation in logistics chain. En: *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5, 1657 - 1672.
- ZHOU, G.; MIN, H. & GEN, M. (2002). The balanced allocation of customer to multiple distribution centers in the supply chain network: a genetic algorithm approach. *Computer and Industrial Engineering*, 43 (1-2), 251-261.



# LUPA

EMPRESARIAL

No - 18 Agosto 2017