



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

APLICACION DE TECNICAS DE
OPTIMIZACION EN PROBLEMAS DE
RUTEO VEHICULAR

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :
JOSE MARIA SANCHEZ GUZMAN

ASESOR:
DR. RICARDO ACEVES GARCIA



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

U. M. A. 66
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES - CUAUTITLAN



Departamento de
Exámenes Profesionales

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

Aplicación de Técnicas de Optimización en Problemas de Ruteo Vehicular.

que presenta el pasante: José María Sánchez Guzmán
con número de cuenta: 09757704-7 para obtener el título de :
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 20 de Septiembre de 2004

PRESIDENTE Ing. José Juan Contreras Espinosa

VOCAL M.A. Gerardo Sánchez Ambríz

SECRETARIO Dr. Ricardo Aceves García

PRIMER SUPLENTE Ing. Reyes Hugo Torres Merino

SEGUNDO SUPLENTE M.A. Víctor Hugo Alvarez Juárez

Agradecimientos.

A mis abuelos

Por haber tenido la paciencia para cuidarnos y sacarnos adelante a mi hermano mayor y a mí, sin tener la obligación moral de hacerlo, solo lo hicieron por el gran amor que tenían hacia nosotros, muchas gracias.

A mi abuelo Simón.

Por haberme enseñado con el ejemplo, que siempre el bien estar de la familia esta antes que todo, y porque a pesar de su horario de trabajo siempre nos brinda tiempo, cariño y respeto, gracias.

A mi abuela Dimas.

Por su entereza como persona, logro darnos una excelente formación como personas, y a mi en lo particular que toda su vida me impulso incondicionalmente para lograr mis sueños, nunca me dejo caer, bastaba con unas cuantas palabras para levantarme y motivarme a seguir luchando para lograr mis objetivos, siendo la persona que siempre estuvo detrás de mi cuidándome, inculcándome una serie de valores fundamentales para tratar de ser una excelente persona, y porque una de sus preocupaciones que tuvo toda su vida y hasta el ultimo momento que estuvo conmigo fue el que yo estuviera bien y que no me faltara nada, MUCHISIMAS GRACIAS ABUE, todo se lo debo a usted, LA QUIERO MUCHO.

A mi Padre.

Papá te agradezco infinitamente, porque en todos los aspectos importantes de mi vida has estado a mi lado, siendo además de padre un gran amigo, por impulsarme a seguir adelante para aprovechar la oportunidad que tu no tuviste, por enseñarme a trabajar y a ser una persona responsable, te admiro bastante Pa'.

A mis hermanos.

Juan, Jorge, Beto, les agradezco el estar siempre que los necesito y recibirme siempre con una sonrisa o una broma para alegrarme.

A mi hermano Juan.

Eres parte importante de cada uno de mis logros, cada paso que doy, cada cosa que intento realizar siempre estas al pendiente para que no me falte nada, nunca has dejado de cuidarme y me siento afortunado al contar con un apoyo como el tuyo, en especial comparto esta meta contigo, te estoy y te estaré eternamente agradecido.

A mi novia Vanesa.

No dejo de apreciar el momento que comenzaste a ser parte de mi vida, me has enseñado muchas cosas, has sembrado en mi amor, gracias por estar conmigo en todo momento, por compartir mis penas, mis alegrías, mis éxitos y mis intentos fallidos, gracias por brindarme tu cariño, confianza, apoyo y comprensión, eres gran parte de mi, TE AMO.

A mis amigos.

Agradezco a todos y cada uno de mis amigos que han formado parte de mi historia, a los que estuvieron y ya no están por algún motivo, a los que estuvieron y siguen estando: Ray, Marissa, todos los compañeros de la selección de básquetbol, a los compañeros del trabajo, y en especial a mi amigo Abimael que siempre ha estado ayudándome incondicionalmente y por apoyarme a la culminación de este trabajo.

A mi asesor: Dr. Ricardo Aceves García.

Por compartir su tiempo, ayuda y sus conocimientos en la realización de este trabajo, mi más sincero agradecimiento.

A la UNAM

Por permitirme ser parte del orgullo puma y en especial a la FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN que fue testigo de la formación que recibí como profesional.

Y un agradecimiento muy especial a **Dios**, por darme la oportunidad de vivir esta vida rodeado de personas que me hacen crecer.

Contenido

Introducción	1
Objetivo general.....	4
Objetivo particular.....	4
Capitulo 1.....	5
1. El problema de distribución de mercancías.....	5
1.1. Marco logístico.....	7
1.2. La logística en la práctica	13
1.3. Importancia de la distribución física de carga	25
1.4. Tipos de problemas de la distribución física.....	28
Capitulo 2.....	34
2. Teorías para resolver problemas de distribución	34
2.1. Principales componentes de VRP	35
2.2 Modelo de P.L. para el ACVRP	40
2.3. El enfoque cuantitativo	42
2.4. Uso eficiente de vehículos.....	45
2.5. Pautas para diseño de rutas vehiculares	51
2.6. Uso eficiente del camino.....	55
Capitulo 3.....	57
3. Análisis de los métodos de solución de problemas de distribución.....	57
3.1. El modelo de la ruta más corta	58
3.2. El modelo de transporte.....	61
3.3. El problema del agente viajero	70
3.4 El método de barrido	76
3.5 Secuenciación temporal de rutas.	79

Capítulo 4.....	82
4. Software para problemas de ruteo vehicular.....	82
4.1. Guías para el uso práctico de programas de ruteo vehicular.....	84
4.2. Software comercial para ruteo vehicular.....	85
4.3. Software didáctico para solución de problemas de ruteo vehicular.....	89
 Capítulo 5.....	 91
5. Aplicación práctica.....	91
 Conclusiones.....	 100
Anexo.....	105
 Bibliografía.....	 105

Introducción

Las actividades relacionadas con la recolección y distribución de carga, a las que frecuentemente la literatura logística se refiere con el nombre genérico de distribución física, se presentan de modo cotidiano en varias etapas de la actividad industrial, manufacturera y comercial.

En el primer capítulo, se muestra el uso del enfoque logístico como un marco conceptual de referencia que permite organizar la discusión de la problemática de manera sistemática y razonada en todas las etapas del proceso productivo, desde la obtención de materias primas hasta el envío de productos terminados a los consumidores finales.

Los movimientos de carga ocurren en varias etapas: el suministro de materias primas, partes y refacciones que los proveedores envían a las fábricas; los flujos de bienes intermedios y productos semielaborados que van a otros centros de manufactura; el transporte de productos terminados que van de la fábrica a los almacenes o centros de distribución y finalmente los flujos de productos terminados que van de los almacenes hacia los consumidores finales.

El capítulo 2, siguiendo un esquema básico de ingeniería del transporte se presentan en dos apartados los métodos para diseñar rutas: los relacionados con el uso eficiente del camino y los relacionados con el uso eficiente de vehículos.

En la distribución física de carga hay varios aspectos que reclaman la atención de los operadores en la actividad, como pueden ser la ubicación y selección de los proveedores de insumos, la planeación de localización de nuevos almacenes, el manejo de inventarios en los centros de distribución

ya existentes y la administración de las flotas vehiculares que realizan el transporte en las etapas ya mencionadas. Todos estos aspectos exigen la toma de decisiones con la finalidad de que la distribución física sea llevada a cabo de la manera más eficiente posible, ya sea en cuanto a la minimización de los costos operativos, la maximización del nivel del servicio o cualquier otro criterio que sea de interés para los responsables de esas decisiones.

En el capítulo 3, se examinan modelos bastante conocidos y probados en el ámbito de investigación de operaciones, como son: el modelo de la ruta más corta, el modelo del transporte y el modelo del agente viajero. Estos modelos resuelven los problemas para determinar las mejores rutas en los casos de un solo origen y un solo destino (ruta más corta), de varios orígenes y varios destinos (modelo del transporte) y de origen y destino coincidentes (modelo del agente viajero). En este apartado también se explora la problemática general de diseñar rutas con las restricciones necesarias a los movimientos de los vehículos. Estas restricciones, como pueden ser los límites a la capacidad de carga de los vehículos, los valores máximos para distancias y/o tiempos en las rutas, o la determinación de horarios de entregas o colectas con los clientes (llamados ventanas de tiempo), dan mucho más realismo al planteamiento de los problemas, pero llevan la inevitable complicación del diseño de algoritmos óptimos. La respuesta que han dado los métodos heurísticos, que obtienen soluciones prácticas, aunque algo alejadas del óptimo matemático ideal, se revisan con el examen de un método de este tipo que ha mostrado ser bastante eficiente en la operación logística: el método de barrido.

Las decisiones que los despachadores de vehículos tienen que tomar en cuanto a la mejor ruta para cubrir las demandas de entrega/colecta, el número de vehículos que conviene asignar a las rutas o el orden en que

deben visitarse a los puntos de entrega/colecta, no son siempre obvias, ni salta a la vista la mejor opción en la mayoría de los casos. Existe una amplia literatura sobre la temática de ruteo vehicular, desde artículos y enfoques muy teóricos con sustento matemático muy formal, hasta recomendaciones prácticas de operadores expertos o paquetes de cómputo diseñados para manejo de flotas vehiculares.

El capítulo 4, trata los aspectos relativos al uso de modelos computacionales y de software comercial reciente para el ruteo vehicular, se presentan en una panorámica que da idea de las posibilidades de uso de este tipo de programas en las empresas transportistas, así como de las limitaciones y requerimientos que deben satisfacerse para una explotación intensiva de los mismos.

Finalmente en el capítulo 5, se muestra un ejemplo práctico donde se comparan los resultados de determinar los recorridos de vehículos en base a la experiencia obtenida por los operadores de transporte y los resultados obtenidos basándose en métodos cuantitativos.

En este trabajo se abordan solamente los aspectos básicos del problema de manejar las flotas vehiculares con las que se efectúan los movimientos de carga y a fin de tener panorama del tema de ruteo, en los capítulos del trabajo se revisan varios procedimientos de apoyo a la toma de decisiones en este tipo de problemas y se proponen técnicas y sugerencias que han mostrado ser útiles para las tareas que tienen que enfrentar los despachadores de flotas vehiculares de carga.

Objetivo general

El objetivo de este trabajo es plantear el uso de métodos cuantitativos para lograr eficientar las tareas de ruteo vehicular en la distribución física, y en consecuencia, como obtener un elemento adicional de competitividad en las empresas, que contribuirá tanto a su supervivencia en el ambiente globalizado del mercado, como a su expansión hacia escalas mayores de operación.

Objetivo particular

Este trabajo lleva especial atención en analizar métodos cuantitativos para resolver problemas de ruteo vehicular. Estos métodos pueden aplicarse en redes de transporte muy generales, representando cualquier modo de transporte, sin embargo, dada la permanencia e importancia que tiene el auto transporte en los movimientos de carga terrestre en nuestro país, mucho del análisis se hará alrededor de la problemática para el ruteo de vehículos en el transporte carretero de carga.

1. El problema de distribución de mercancías

Normalmente, el transporte constituye el costo logístico individual más importante para la mayoría de las empresas. Se ha observado que el movimiento logístico absorbe entre uno y dos tercios de dichos costos además de representar alrededor del 9% del producto nacional bruto de la economía, por ello es importante que se tenga buena comprensión y conocimiento de todos los temas relacionados. Si se quiere ver el papel que juega el transporte en la economía, no es necesario nada más que comparar la economía de una nación desarrollada con la de una nación en desarrollo. Las actividades relacionadas con la distribución y recolección de carga, a la que frecuentemente la literatura logística se refiere con el nombre de “distribución física” se presentan de modo cotidiano en varias actividades del sector industrial, manufacturero y comercial.

Estos movimientos de carga ocurren en varias etapas: el suministro de materias primas, partes, refacciones que los proveedores envían a las fábricas, los flujos de bienes intermedios y productos semielaborados que van a otros centros de manufactura, el transporte de productos terminados que va de las fábricas a los almacenes o a centros de distribución, y finalmente los flujos de productos terminados que van de los almacenes hacia los consumidores finales.

En la distribución física de carga hay varios aspectos que reclaman la atención de los operadores en la actividad, como puede ser la ubicación y selección de proveedores de insumos, planeación de la localización de nuevos almacenes, manejo de inventarios en los centros de distribución ya

existentes y la administración de las flotas vehiculares que realizan el transporte en las etapas ya mencionadas. Todos estos aspectos exigen una toma de decisiones con la finalidad de que la distribución física sea llevada de la manera más eficiente posible, ya sea en cuanto a la minimización de los costos operativos, la maximización del nivel de servicio o cualquier otro criterio de interés para los responsables de esa toma de decisiones.

Las decisiones que los operadores logísticos deben tomar en cuanto a la mejor ruta para cubrir las demandas de entrega, el número de vehículos que conviene asignar a las rutas o el orden en que se deben visitar estos puntos de entrega, no son siempre obvias, ni se nota la mejor opción en la mayoría de los casos. Además de considerar, antes de establecer las rutas del vehículo, el tiempo que transcurre entre la emisión del pedido hasta la recepción de mercancías solicitadas, ya que este es un ciclo y contiene todas las actividades necesarias para que el cliente reciba los productos solicitados entre las cuales se reparte el tiempo que transcurre hasta la recepción. Aquí se muestra la importancia relativa de cada aspecto, siendo clasificados como los más importantes los elementos relacionados con el factor tiempo:

- Tiempo medio de entrega,
- Variabilidad del tiempo de entrega,
- Información sobre la situación del pedido,
- Servicio de urgencia,
- Formas de hacer el pedido,
- Tratamiento de reclamaciones,
- Precisión de los envíos,
- Política de devoluciones,
- Procedimientos de facturación,

1.1. Marco logístico

El impacto que tiene el movimiento de carga en la rama económica del transporte se da de forma natural en la actividad productiva manufacturera. Es aquí donde la logística tiene una participación relevante aportando una serie de procedimientos para las actividades productivas, desde el manejo de materias primas teniendo participación en las actividades intermedias como almacenaje y producción, hasta la entrega del producto terminado al consumidor final.

El termino “logística” fue utilizado en la guerra y se refería al movimiento de tropas y transporte, aun así, en la actualidad no se tiene una definición general de lo que se entiende por logística en la empresa, hay propuestas que buscan homogenizar puntos de vista y así permitir establecer marcos conceptuales para referirse a las tareas de manejar eficientemente los flujos de productos que llegan a los consumidores finales. Una de las propuestas con las que se cuentan fue hecha en 1996¹ y es:

“La logística es la colección de actividades asociadas con la adquisición, el transporte, el almacenamiento y el reparto de mercancías (es decir, los productos en todas sus etapas de manufactura, servicios e información)”.

El significado de la logística en la empresa se va transformando según la evolución del concepto de desplazamiento, si el desplazamiento es visto de manera “pasiva”, la logística es determinada como un

¹ De acuerdo con *Logistics Institute* del Georgia Institute of Technology, 1996. Documento de Internet: <http://tli.isye.gatech.edu/downloads/lcmwppr.pdf>.

procedimiento obligado en el proceso de producción-distribución, donde la logística es enfocada a gestionar las operaciones de transporte para reducir al mínimo los costos satisfaciendo la demanda. Si la empresa tiene la visión del concepto de desplazamiento de manera “activa” será tratado como una opción estratégica, donde desarrollara más que una unidad de transporte, un servicio corporativo logístico que intervenga en los problemas de circulación de mercancías (materias primas, productos semiterminados y terminados), gestión de inventarios y definición del ritmo de producción.

Así, la logística como método de circulación es una opción fundamental de integración del control del movimiento físico de mercancías en la estrategia global de la empresa, ya sea con medios propios o subcontratados donde la empresa tiene absoluto control.

Independientemente del consenso que pudieran tener las definiciones, la logística se ha mostrado como un valioso apoyo en la industria en general y en otras actividades como el transporte de carga, los servicios postales o el servicio público de transporte urbano.

Entre las razones que se tienen para el apoyo en la logística se consideran las siguientes:

- El ambiente competitivo entre modos de transporte: en México, en los Estados Unidos (principal socio comercial) y en otros países del mundo, la competencia en todos los modos de transporte es un hecho. La consecuencia directa de esto ha sido la mayor oferta de servicios de transporte, y por tanto una mayor complejidad en el armado de las cadenas de transporte, que buscan minimizar los

costos de operación de las empresas. Eso, a su vez, ha significado más oportunidades de negocio en este ambiente.

➤ La globalización de los mercados: el fenómeno que también es ya un hecho en México es el de la globalización y se refleja en los flujos de productos desde y hacia diversos puntos del país y del mundo entero, lo que ha dado mayor complejidad al manejo de las cadenas de transporte. Respecto de las empresas transnacionales, ha propiciado la instalación de plantas maquiladoras en distintos puntos del país donde anteriormente no se tenían flujos hacia destinos extranjeros.

➤ La competitividad basada en la satisfacción del cliente: la intensa competencia resultante de los modos de transporte así como la globalización de los mercados, ha llevado a las empresas transportistas a impulsar su competitividad en el servicio al cliente. Esto ha significado para los operadores de logística en las empresas, enfrentar las solicitudes de los clientes en cuanto a la puntualidad, periodicidad y rapidez con las que se efectúan las entregas y las colectas de productos, de manera que la satisfacción total del cliente, sea la base de la retención del mismo y crecimiento del negocio.

➤ Los requerimientos de carácter ambiental: la importancia que los aspectos de conservación del ambiente tienen en la legislación actual, ha incidido también en las prácticas logísticas. Los requerimientos de conservación de niveles aceptables de emisiones contaminantes, niveles de ruido en carreteras o modificaciones estructurales al ambiente natural, han enfrentado a

los decisores logísticos a cambiar sus maneras de resolver problemas de ubicación de centros de distribución, centros de manufactura, rutas elegibles o combinación de modos de transporte (transporte multimodal). Todo esto, naturalmente, agrega complicaciones a las actividades de optimización de flujos vehiculares.

- Los avances tecnológicos: el desarrollo tecnológico de las telecomunicaciones y los sistemas computacionales, han incidido de manera favorable en las tareas logísticas. El uso de sistemas de códigos de barras, sistemas geográficos de información, sistemas de geoposicionamiento o sistemas de intercambio electrónico de información (EDI = *Electronic Data Interchange*), han permitido a las empresas agilizar los aspectos de identificación de embarques, localización, facturación y seguimiento, redundando en mayores velocidades de procesamiento y respuesta a los clientes.

El flujo de materiales y productos gestionados en un sistema logístico constituido por proveedores, fábricas y almacenes, se dividen en tres subsistemas: aprovisionamiento, producción y distribución física². Los principales elementos del servicio y los objetivos centrales en estos subsistemas se pueden ver en la tabla 1.

Los elementos de servicio para la distribución física de la tabla son disponibilidad y despacho, expresan que el producto debe estar en el tiempo y lugar indicado para competir en el mercado; y por otra parte revela

² Según: E. A. Arbones, Logística Empresarial, Marcombo Boixareu Editores, España 1990.

que el transporte es parte esencial en aprovisionamiento como en la distribución física.

Subsistema	Objetivos		
	Elementos de servicio	Para	Costos relevantes
Aprovisionamiento	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Calidad ➤ Disponibilidad 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Materias primas ➤ Piezas/refacciones ➤ Mercancías 	Compras + transporte de aprovisionamiento + inventarios de materiales
Producción	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Calidad ➤ Disponibilidad 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Producto terminado 	Manufactura + almacenes de productos + Proceso de terminado
Distribución física	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Disponibilidad ➤ Despacho 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Producto terminado ➤ Mercancías 	Transporte de distribución + Almacenamiento

Tabla 1³.

La figura 1, muestra un esquema básico de una cadena logística de abastecimiento y aparecen preguntas clave que es necesario responder para tener un flujo eficiente de productos desde su origen hasta su consumo final⁴. El esquema muestra la operación de la cadena, iniciando con proveedores que suministran materias primas a los centros de distribución, para finalmente enviarlos desde ahí hasta los consumidores finales.

Así se puede determinar de esta forma que tamaño de la flota vehicular utilizar para las distintas actividades de manufactura, el diseño de rutas para la distribución física, determinar que tan frecuentemente se harán entregas, etc.

³ Referencia: E. A. Arbones, *Logística Empresarial*, Marcombo Boixareu Editores, España 1990.

⁴ Fue publicada por: *Logistics Composite Modeling* del Logistics Institute at Georgia Tech, 1996.

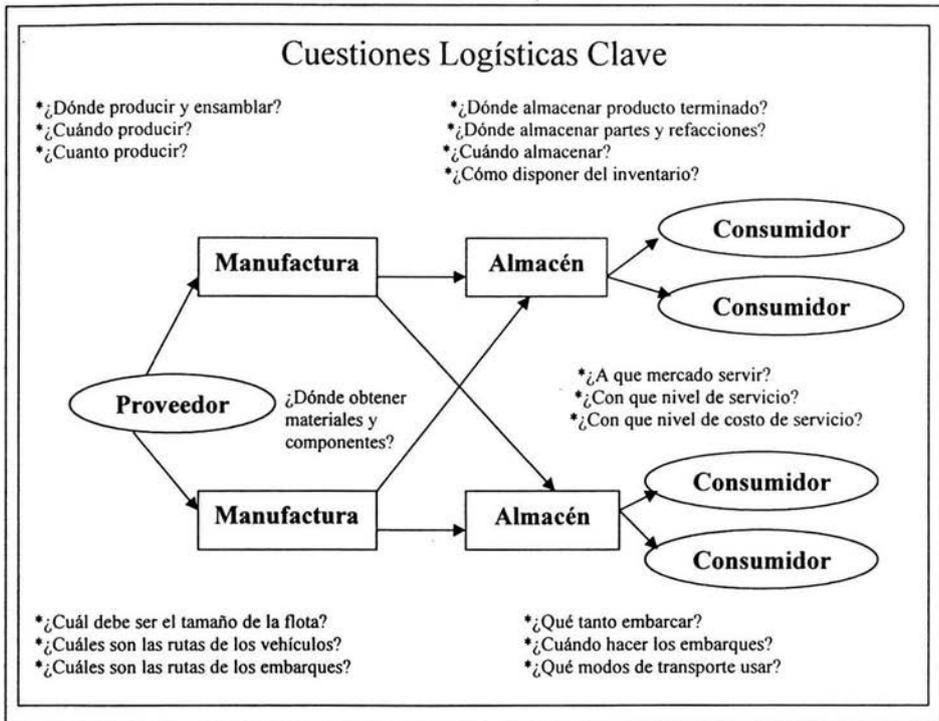


Figura 1⁵. Cuestiones logísticas claves

Las preguntas mostradas en el esquema anterior son una muestra básica de las actividades centrales que deben ser tomadas en cuenta para una correcta práctica logística y se debe resaltar que se tienen dos características fundamentales que son:

1. Pueden surgir objetivos para distintas áreas de la empresa que entren en conflicto, lo que lleva a adoptar enfoques de trueque o intercambio a fin de lograr una eficiencia óptima global para la cadena logística.
2. Como consecuencia de lo anterior, los enfoques pragmáticos ya son insuficientes para los grandes problemas, y el uso de métodos

⁵ Adaptado de: Ratliff H.D. & Nulty W.G., *Logistics Composite Modelling*, The Logistics Institute at Georgia Tech, 1996.

cuantitativos es esencial para lograr una toma de decisiones inteligente.

Esta última característica de las cuestiones centrales de la logística ha sido descrita⁶:

“...hacemos notar que tenemos una firme convicción que la logística es una de las áreas en que el análisis matemático riguroso conduce no solamente a resultados limpios y elegantes, si no que aún más importante, ha tenido y seguirá teniendo un impacto significativo en la práctica logística.”

1.2. La logística en la práctica

El manejo que dan muchas empresas a las actividades claves de la logística referidas en la figura 1, con frecuencia no se basan en un sistema de aplicación propuesto, lo cual lleva a la necesidad de elaborar un plan para llevar a cabo tal práctica logística y este debe contemplar básicamente:

- a) Clasificación de los artículos estableciendo sus características logísticas.
- b) Nivel de la actividad logística a desarrollar en general y para cada artículo, así como el tipo de ella.
- c) Escalonamiento o etapas de transporte y almacenamiento que deben recorrer los artículos, proceso logístico e implantación de almacenes.
- d) Distribución de los centros logísticos.

⁶ Descrita por: Bramel, J. & Simchi-Levi, *The Logic of Logistics: Theory, Algorithms and Applications for Logistics Management*, Springer Series in Operations Research, New York, 1997.

El plan logístico más adecuado depende de la política de aprovisionamiento, volumen de estos, sistemas de transporte y almacenes existentes, productos y elementos manejados, así como la evolución futura esperada

En una descripción muy general⁷, describen la experiencia de Estados Unidos en ese sentido.

En primer término, las empresas han tendido a repetir las prácticas que han funcionado en el pasado. Así, por ejemplo, si el nivel de seguridad en el inventario utilizado en el ciclo anterior no produjo conflictos por desabasto, entonces se propone el mismo nivel de seguridad para manejar el inventario en el nuevo ciclo; del mismo modo, si la organización de las rutas de distribución logro que todos los destinos recibieran a tiempo sus entregas, entonces no parece necesario modificarlas.

En segundo lugar, existen en el ambiente de operación reglas empíricas que han surgido de la experiencia y que tiene cierta eficacia comprobada. Por ejemplo, la regla 80/20⁸ usada por muchos operadores logísticos supone que cerca del 80% de los costos son generados por aproximadamente el 20% de los productos, por lo que se recomienda entonces concentrar los esfuerzos en ese grupo crítico de productos.

Otro ejemplo común en las redes logísticas norteamericanas es el criterio de que, si una empresa da el servicio en el área continental de Estados Unidos y requiere un centro de distribución, este deberá ser

⁷ En una descripción muy general, citan la experiencia norteamericana es este sentido Bramel, J. & Simchi-Levi, *The Logic of Logistics: Theory, Algorithms and Applications for Logistics Management*, Springer Series in Operations Research, New York, 1997.

⁸ Principio manejado en calidad, que son utilizados en los diagramas de Pareto.

ubicado en el área de Chicago; en cambio, si requiere de dos centros de distribución, con tener uno en el área de los Ángeles y otro en el área de Atlanta; estará bien localizado.

Finalmente, se ha notado en los últimos años, simultáneamente con el auge de la logística, un interés de muchas compañías en buscar la experiencia y conocimiento de expertos y consultores en el tema, la idea detrás de esto es que, los métodos que han trabajado con éxito en las empresas de la competencia, también deberían ser buenos para la propia empresa.

La práctica de distribución en México es en si muy similar a la práctica realizada en Estados Unidos, se han adoptado los sistemas de distribución, esto por que la mayoría de las empresas que ofrecen servicios logísticos en México, son de Estados Unidos; tal es el caso de Walmart, Redwood Systems, etc.

A continuación se reporta una investigación de campo realizada por Angélica Lozano⁹ que se enfoco a conocer las prácticas de distribución-recolección de empresas ubicadas en el área metropolitana de la Ciudad de México, algunas de las cuales también dan servicio a todo el país. La encuesta levantada se diseño para conocer los siguientes aspectos:

- Políticas de distribución
- Área de distribución
- Prácticas de distribución
- Diseño de rutas
- Restricciones de la distribución

⁹ Lozano Cuevas Angélica, *Diseño de Rutas de Distribución y Recolección en Regiones de Diferentes Formas Bajo Restricciones de Capacidad de los Vehículos*, Tesis de Maestría en Investigación de Operaciones, DEPMI/UNAM, 1993.

Las empresas que fueron evaluadas se presentan en la tabla 2.

Empresa	Funciones
MARZAM	Distribuye productos farmacéuticos desde el laboratorio hasta farmacias. Atiende la zona metropolitana de la Ciudad de México y el interior del país.
MARPROA	Transportista del servicio de Autrey; distribuye productos a farmacias. Atiende a todo el país, 10% del servicio en el área metropolitana.
SABRITAS	Fabricante y distribuidor de productos alimenticios. Sirve a todo el país.
ESTAFETA	Empresa de paquetería. Atiende a todo el país.
BIMBO	Fabricante y distribuidor de productos de panificación, botanas y dulces. Atiende a todo el país. En el área metropolitana sirve aproximadamente a 115 mil puntos.

Tabla 2. Empresas evaluadas.

Para tener una idea general de los aspectos que intervienen en el manejo de rutas, en seguida se muestran los resultados de la encuesta en cuanto a políticas de distribución, prácticas de distribución y diseño de rutas para las empresas antes mencionadas (ver tablas 3-7).

MARZAM	
Políticas de distribución	<ul style="list-style-type: none"> ○ Vender el servicio. ○ Entregar los pedidos lo más pronto posible. ○ Tiene un solo depósito; aunque en la fecha de la encuesta ya había planes para abrir otro más.
Prácticas de distribución	<ul style="list-style-type: none"> ○ El vendedor levanta el pedido desde cada farmacia usando una computadora TP20, o el propio cliente hace el pedido por teléfono. ○ La facturación esta computarizada. ○ Los pedidos se surten con ayuda de bandas, estando listos antes de las 6:00 a.m. ○ La flotilla de camionetas de reparto es propia y utiliza gas como combustible.
Diseño de rutas	<ul style="list-style-type: none"> ○ La gerencia de distribución genero las rutas, basándose en mapas y recorriendo el 90% de las mismas. ○ No se utiliza software ni modelos matemáticos para el diseño de rutas. ○ El recorrido de la ruta se hace conforme a los horarios de las farmacias y la distancia entre ellas. ○ Los vehículos salen del depósito hacia su zona de distribución y recorren la ruta conforme al diseño de la misma, pero esta puede ser alterada por decisión del conductor.

Tabla 3. Resultados para la empresa Marzam.

MARPROA	
Políticas de distribución	<ul style="list-style-type: none"> ○ Vender el servicio. ○ Los vehículos tienen salidas programadas, aún cuando no se llene el vehículo. ○ Tiene un solo depósito.
Prácticas de distribución	<ul style="list-style-type: none"> ○ La carga se efectúa con apoyo de montacargas, rieles y patinetas. ○ En algunas camionetas la carga se mantiene acondicionada con enfriadores y extractores de aire. ○ La flota es propia, y se compone de 35 tráileres, 10 camiones "rabones" y 15 camionetas pick-up. ○ La facturación de la mercancía transportada es realizada por el propio conductor.
Diseño de rutas	<ul style="list-style-type: none"> ○ Manejan 8 rutas en el área metropolitana de la ciudad de México, las cuales fueron definidas por los propios operadores. ○ No se usa software ni modelos matemáticos para el diseño de las rutas.

Tabla 4. Resultados para la empresa Maarproa.

SABRITAS	
Políticas de distribución	<ul style="list-style-type: none"> ○ Maximizar la calidad del servicio y el número de clientes manejados. ○ Los clientes son visitados tres veces por semana, cada tercer día. ○ Existen varios de positos o sucursales que cubren el área metropolitana. ○ Los productos manejados tiene un código de caducidad y deben ser cambiados antes del vencimiento de cada fecha. ○ Los vendedores no tiene sueldo fijo, solamente comisiones por lo que cargan en el vehículo que operan.
Prácticas de distribución	<ul style="list-style-type: none"> ○ Cada vendedor lleva el registro de las ventas para cada uno de sus clientes y así estiman la demanda requerida. ○ Los vehículos son cargados por la mañana, con el pedido que previamente hizo el operador, de acuerdo a la demanda esperada. ○ El cliente hace su pedido al momento que el vendedor llega al establecimiento. ○ El pago se hace en efectivo y la facturación la hace el vendedor al momento de la entrega de los productos. ○ Los vendedores no pueden regresar antes de las 4:00 P. M., con la finalidad que tengan más tiempo de buscar más clientes y ampliar sus rutas. ○ La revisión de las ventas se hace semanalmente

	<ul style="list-style-type: none"> ○ La flota usada es propia y se compone principalmente por camioneta tipo vanette, combis y motocicletas.
Diseño de rutas	<ul style="list-style-type: none"> ○ El vendedor (conductor) hace el reparto según su propio criterio. ○ Las rutas que se saturan de clientes son reestructuradas. ○ Se da servicio a rutas que cubren grandes áreas con pocos clientes y también a rutas que cubren áreas pequeñas con muchos clientes. ○ Los vendedores tardan un promedio de 10 minutos en atender a cada cliente. ○ No se utiliza software ni modelos matemáticos para el diseño de rutas

Tabla 5. Resultados para la empresa Sabritas.

BIMBO	
Políticas de distribución	<ul style="list-style-type: none"> ○ Se tienen aproximadamente 10 agencias de distribución por cada marca de producto manejado (BIMBO, MARINELA, BARCEL, etc.) ○ No hay clientes con prioridades (no importa el tamaño de consumo del cliente) ○ El producto maltratado o caducado es recogido y comercializado como pan frío o desperdicios alimenticios para animales.

	<ul style="list-style-type: none"> ○ Existe un concurso de seguridad vial entre los conductores. ○ No cuentan con seguro para sus vehículos. ○ Para casos de emergencia, los clientes son atendidos con vehículos suplentes.
<p>Políticas de distribución</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Manejan 2500 vehículos de distribución (Vanette y Nissan) en la zona metropolitana de la Ciudad de México, con capacidades de 1 a 3.5 toneladas. ○ Las agencias no tiene inventarios; se surten diariamente por tráileres que llegan desde las fábricas y entregan antes de las 6:00 A.M. ○ El tiempo de carga de los vehiculos dura aproximadamente 20 minutos. ○ La distribución dura 8 horas, iniciando a las 6:30 A.M. ○ La revisión de veta es diaria ○ Los vehículos de distribución no llevan cargas de menos de la mitad de su capacidad ○ La mercancía es colocada en jaulas con carriles para charolas. ○ Se arma el "mix" (mezcla de productos que integran el pedido) en el mismo sitio donde esta el cliente, y la facturación y cobro lo hace el propio vendedor. ○ Las agencias llevan estadísticas de los volúmenes diarios de productos que salen, con esta base estiman las demandas. ○ El tiempo para comer de los vendedores se incluye en su horario de distribución, es variable.

<p>Diseño de rutas</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Manejan rutas fija y la distribución se hace de forma radial. ○ Cada vehículo distribuye aproximadamente a 45 puntos diarios y la distancia semanal recorrida en promedio es 200 km. ○ Según el tipo de producto, cambia la frecuencia de la distribución. ○ Los vehículos tardan a lo más 30 minutos de ir desde la agencia a su zona de distribución; sus velocidades medidas son de 40 km/h en la ciudad y 80 km/h en carretera. El tiempo aproximado de servicio a cada cliente es de 10 minutos. ○ El itinerario de forma de reparto es determinado por los operadores. ○ Las rutas se rectifican para mejorar el servicio cuando se tienen muchos clientes en una ruta, o en caso contrario, cuando una ruta resulta incosteable. ○ No se usa software ni modelos matemáticos para el diseño de rutas. ○ No hay cambios estacionales relevantes en el nivel del servicio.
------------------------	--

Tabla 6. Resultados para la empresa Bimbo.

ESTAFETA	
Políticas de distribución	<ul style="list-style-type: none"> ○ Vender el servicio de distribución de paquetería. ○ Entregar los paquetes antes de las 11:30 A.M. del día siguiente de su colecta. ○ El proceso de colecta se hace generalmente en las tardes y el de distribución por las mañanas. ○ Hay un solo depósito en el área metropolitana de la Ciudad de México.
Prácticas de distribución	<ul style="list-style-type: none"> ○ Los vehículos que llegan al depósito (centro operativo) cargados de la paquetería procedente de las bases flotantes (oficinas) son a las 6:00 A.M. diariamente. ○ La facturación y el pago del servicio puede hacerse en las oficinas o en el domicilio del propio cliente. ○ La flota de vehículos es propia y el transporte entre centros operativos se hace con camiones.
Diseño de rutas	<ul style="list-style-type: none"> ○ Cada uno de los supervisores del sector diseña sus rutas, principalmente con base a los códigos postales y colonias. ○ No se usa software ni modelos matemáticos para el diseño de rutas, pero la empresa ya muestra interés para obtener mapas digitalizados de la Ciudad de México para auxiliar el diseño computarizado de rutas. ○ Las rutas usadas son prácticamente fijas, no hay cambios frecuentes. Por otra parte, los puntos de colecta y distribución no tienen variaciones de consideración. ○ En función del volumen a distribuir o coleccionar, se utilizan

	<p>diversos medios de transporte: bicicletas, motocicletas, sedanes o combis.</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Según la zona en que opera la ruta, pueden asignarse de uno a tres operadores en cada vehículo.
--	---

Tabla 7. Resultados para la empresa Estafeta.

Las principales conclusiones reportadas en esta investigación fueron las siguientes:

- Los procedimientos de distribución resultaron tan diferentes como distintas fueron las empresas, aún cuando se pudo apreciar una influencia del tipo de producto en el proceso de distribución.
- Las políticas seguidas por las empresas determinan en gran medida el modo en que se realiza la distribución.
- Pese a las diferencias en los distintos modos de distribución-recolección de las empresas, se encontraron cuatro rasgos comunes:
 - No utilizan paquetes de cómputo ni modelos matemáticos para el diseño de sus rutas, si no que estas se conforman manualmente, apoyándose principalmente en la experiencia.
 - Se tiene rutas definidas, aún cuando los puntos en los que se colecta o se entrega cambien continuamente, incluso con una frecuencia diaria.
 - Siempre dividen a la región de servicio en subzonas.
 - No se ocupan de minimizar su costo de distribución, o de maximizar el uso de la capacidad de los vehículos, más bien se orientan a efectuar la distribución física cumpliendo con las restricciones operativas que se tengan.

Se puede notar que son muy diversas las prácticas logísticas que se encuentran en uso por las empresas que necesitan flotillas de transporte, diseño de rutas y manejo de cargas. En general, puede decirse que, aún cuando las estrategias que las empresas han utilizado en la práctica suelen tener sentido, no resulta claro cuanto se pierde por no utilizar un enfoque de solución óptima de problemas, o al menos de solución cercana al óptimo, en los casos en los que no sea práctico calcular el verdadero óptimo¹⁰.

1.3. Importancia de la distribución física de carga

Los tratados comerciales que tiene México con los diferentes países del mundo haciendo mención principalmente el de libre comercio con Estados Unidos y Canadá, y ahora también con el surgimiento del fenómeno dado de la globalización, muchas compañías están en peligro de salir del mercado debido al bajo precio de las importaciones, sin embargo pueden salir adelante y aún prosperar, usando un arma competitiva de importancia creciente: la logística de calidad.

En la década de los 80's, las compañías se comenzaron a dar cuenta que no solo le importaba el precio del producto al cliente, si no la calidad entonces se enfocaron a mejorar la calidad y la productividad.

En la década de los 90's, la existencia de múltiples productos sustitutos, equivalentes en características y calidad, hace que los clientes completen el servicio para sus decisiones. Para los clientes, los defectos en los servicios logísticos son tan críticos como los defectos en el mismo producto.

¹⁰ Bramel, J. & Simchi-Levi, *The Logic of Logistics: Theory, Algorithms and Applications for Logistics Management*, Springer Series in Operations Research, New York, 1997.

En la década que comenzó en el 2000, se tiene todas las exigencias de épocas pasadas, pero en esta se agregan las exigencias de carácter ambiental, y las presiones que se tiene en el medio de la manufactura como son:

- Manufactura comprometida en el factor tiempo.
- Ciclos de vida de los productos (cada vez más cortos).
- Reducción de tiempos para que el producto se encuentre en el mercado.
- Reducción de costos.
- Disminución de inventarios.

Las decisiones están siendo dirigidas no solo por el precio y la calidad, si no también por el servicio. Las empresas que realcen la importancia de los servicios logísticos como parte de su estrategia de competencia, tendrán conocimiento del mercado y mejor desarrollo financiero.

Desafortunadamente algunas compañías conceden poca importancia a la logística, en comparación con las ventas, la mercadotecnia, el diseño y la fabricación, ya que solo representan el 10% o menos del costo total del producto. Sin embargo, el costo del mal servicio puede igualar o exceder el precio real del producto. Si los envíos llegan tarde, los clientes tienen que mantener exceso de inventario y ordenar anticipadamente. Un envío muy retardado puede detener una línea de producción.

En contraste un buen servicio produce expansión de mercado y mejor desarrollo financiero, por las siguientes razones:

-
-
- Existe el crecimiento en la base de clientes, disminuye el costo de adquisición de nuevos clientes, y a la larga se incrementan las ventas.
 - Se obtiene prestigio por buena logística.
 - Los clientes pueden pagar mejor precio por mejor servicio.
 - Se gasta menos tiempo y dinero en corregir órdenes faltantes.

El objetivo de la logística es poner a disposición del cliente una determinada cantidad de un producto, en el momento que sea demandado, y al mismo costo. Cualquier producto pasa por varios procesos antes de llegar al consumidor. Durante los procesos de aprovisionamiento de materiales de producción y de distribución, el producto sufre desplazamientos. La logística estudia como realizar tales desplazamientos del producto, en formas efectivas en cuanto a costo.

La parte de la logística que es de interés en este trabajo, es la distribución física. El objetivo al resolver un problema de distribución física es conocer la manera de hacer llegar los productos o mercancías desde los depósitos a los centros de consumo, satisfaciendo la demanda al menor costo.

Un buen sistema de distribución física retribuye e la disminución de los costos y el incremento en la variedad de productos y en el mejoramiento del manejo de existencias. Esto es, un buen sistema de distribución brindara al cliente un producto con mejor servicio y menor costo a la vez, haciendo que se incremente el mercado de éste. De aquí que, el estudio y solución del problema de distribución resulta indispensable. El problema de distribución puede presentarse en zonas urbanas como en zonas rurales, y no es igual en ambas.

1.4. Tipos de problemas de la distribución física

En el área metropolitana el problema que se presenta al realizar la distribución física es que los puntos a visitar se encuentran sobre redes de calles muy complejas, cuentan con mucho más puntos de distribución que demandan una gran variedad de productos los cuales deben ser distribuidos de manera distinta y bajo diferentes condiciones, dependiendo de las características del producto y tipo de servicio, esto origina múltiples variantes del problema.

Los problemas de distribución en áreas metropolitanas pueden ser clasificados de acuerdo a:

1. Los servicios que se brinden: distribución y/o recolección.
2. La cantidad de vehículos (uno o varios).
3. La existencia de lugares registrados.
4. La forma de recorrer los puntos.
5. Las restricciones de tiempo.
6. La cantidad de productos (uno o varios)
7. El tipo de entrega (definida o no definida)
8. Las restricciones de capacidad.

1. Distribución y/o recolección.

Los problemas de distribución pueden ser: de distribución y/o recolección. En el primer caso solo se trata de distribución a los centros de consumo, o inversamente, hace la recolección de productos ya caducados o defectuosos, o de los envases reutilizables, o bien de otros productos para

llevarlos de los centros de consumo hacia el o los centros generales de distribución. En esta ultimo caso, los vehículos pueden o no regresar vacíos.

Como en el primer caso se puede citar el problema de distribución de flores. La florería manda los arreglos y no hace recolección de los destinos. Un ejemplo del segundo caso es el problema de distribución y recolección que realizan las empresas de alimentos perecederos, donde existen dos flujos de mercancías: uno que va de los centros de distribución a los centros de consumo, llevando los productos en buen estado, y otro que va de los centros de consumo a los centros de distribución, con los productos caducados.

2. La cantidad de vehículos.

En los problemas de distribución pueden estar involucrados uno o varios vehículos. Si se trata de un solo vehículo el problema se conoce como del agente viajero, si se trata de de varios vehículos con cierta capacidad de carga, se conoce como el problema de rutas.

Un ejemplo del problema del agente viajero es el de distribución de las establecimientos de materiales para construcción, donde, por lo general solo existe un solo vehículo para repartir los materiales a diferentes puntos. Por otro lado la distribución de gas estacionario, es un ejemplo de problema de rutas, el cual una zona de consumo es cubierta por varios vehículos en itinerarios diferentes.

3. La existencia de lugares registrados.

Los problemas de distribución pueden dividirse en; i) los que la distribución de los productos es solo en los lugares que se tienen registro (lugares fijos); ii) los que la distribución es a lugares no registrados, y iii) en los que son una combinación de los dos anteriores.

Como ejemplo del primer caso es posible retomar el problema de distribución de gas estacionario, donde la compañía de gas solo distribuye en los domicilios donde tiene contrato.

En el segundo caso se tiene como ejemplo el problema de distribución de mercancías que realizan las cadenas de almacenes comerciales, en las que sus destinos no están definidos hasta el momento en que se realiza la compra.

Un ejemplo del tercer caso es el problema de la distribución de refrescos, donde la distribución se hace a lugares registrados (como pueden ser tiendas, restaurantes o domicilios particulares) y a lugares que no se tiene definidos (nuevos clientes conseguidos en el proceso de distribución).

4. La forma de recorrer los puntos.

Considerando los problemas de distribución con lugares registrados, estos a su vez pueden ser divididos de acuerdo a la forma como recorran los puntos de consumo, en los que siempre se tocan todos los puntos registrados, y en los que no siempre están todos los puntos.

El ejemplo de las compañías refresqueras es un caso en que siempre se tocan todos los puntos.

El ejemplo de compañía de gas estacionario es un caso en el que no siempre se tocan todos los puntos registrados, es decir, hay ocasiones en las que estando sobre una ruta un vehículo no recorre un punto si sabe que no está programado el consumo en ese punto.

5. Las restricciones de tiempo.

Dentro del problema de distribución pueden tenerse restricciones de tiempo, estas pueden ser en cuanto a:

- El horario de distribución y/o
- La vida del producto

La restricción del horario de distribución o entrega se refiere, tanto a la duración del servicio de transporte como al plazo de distribución de mercancías, y al horario de recepción.

La restricción de la vida del producto consiste en el establecimiento de un horario de distribución dentro del cual el producto se conserve en buen estado.

Un ejemplo de un problema de distribución con restricción del tiempo en la duración del servicio de transporte es el de distribución en las cadenas de almacenes comerciales. En este ejemplo el horario límite de reparto de mercancías es fijado por la propia compañía, dejando para el día siguiente la mercancía no distribuida el día anterior dentro del horario permitido (horario de transporte).

Para el problema de distribución con restricción del tiempo en cuanto al horario de recepción se tiene como ejemplo el de mensajería, en el cual las diversas compañías garantizan la entrega antes de las 12:00 AM.

Como ejemplo de un problema de distribución con restricciones de tiempo en cuanto a vida del producto, y en cuanto al plazo de distribución, se tiene el caso de la distribución de pizzas, en donde estas deben ser entregadas antes de que se enfríen y antes de que transcurra media hora desde el momento del pedido (en algunos casos).

6. La cantidad de productos.

Es posible tener distribución de uno o múltiples productos. En el caso de múltiples se arma un "mix" para cada destino, ya sea en el centro de distribución o en el centro de consumo.

Un ejemplo de un problema de distribución de un solo producto es el de reparto de gas estacionario.

La distribución de botanas es un ejemplo de un problema de diferentes productos donde el "mix" se arma en el centro de consumo.

Por otro lado, la distribución de vehículos de las compañías automotrices es un ejemplo de problemas de múltiples productos donde el "mix" se arma en el centro de distribución, de acuerdo al pedido anticipado de las concesionarias.

7. Tipo de entrega.

La entrega de un problema de distribución puede ser definida o no definida. Se entiende por definida cuando se hace un pedido anticipado al centro de distribución, y por no definida cuando el pedido se hace en el centro de consumo.

Un ejemplo de problema de distribución con entrega definida es el de distribución de las compañías automotrices, mencionadas anteriormente. La repartición de botanas es un ejemplo de problema de distribución con entregas no definidas, donde en cada centro de consumo se entrega lo necesario en ese momento (sin pedido previo).

8. La restricción de capacidad.

Los problemas de distribución pueden ser divididos en; con límite de capacidad y sin límite de capacidad. Entendiéndose como problemas con límite de capacidad aquellos cuya unidad o tamaño del lote del producto sea una fracción significativa de la capacidad de carga.

Un ejemplo de distribución con límite de capacidad es el del calzado, donde el tamaño del lote de entrega es significativo en cuanto con la capacidad del vehículo. La mensajería es un ejemplo de problema de distribución sin límite de capacidad, ya que el tamaño de los paquetes es insignificante en cuanto al tamaño del vehículo.

2. Teorías para resolver problemas de distribución

Los problemas concernientes a la distribución de bienes entre almacenes y usuarios finales (clientes) son generalmente conocidos como Problemas de Ruteo de Vehículos (conocido por las siglas en inglés VRP) o de programación de vehículos.

Entre las aplicaciones se encuentra la colecta de residuos sólidos, limpieza de calles, ruteo de camiones escolares, transporte de minusválidos, ruteo de compradores y mantenimiento de unidades.

A la distribución de bienes concierne el servicio en un periodo de tiempo dado, a un conjunto de clientes por un conjunto de vehículos, que son localizados en uno o en más almacenes, son operados por un conjunto de chóferes, y realiza sus movimientos usando una apropiada red de caminos.

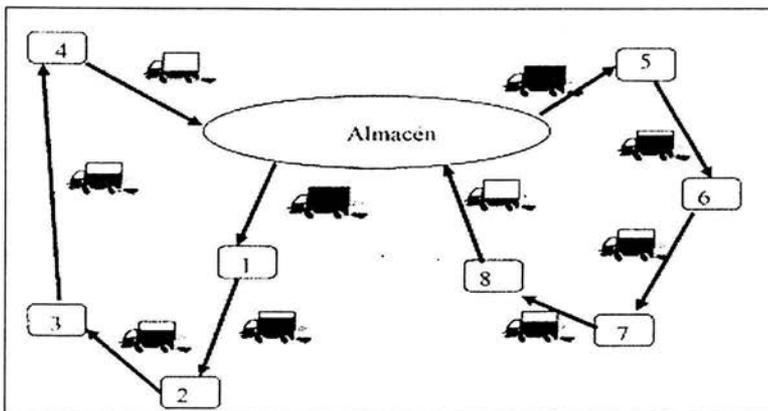


Figura 2¹¹.

¹¹ Fuente: Render, B. & Stair R., *Quantitative Analysis for Management*, Prentice Hall, 1997.

En particular, la solución de un VRP designa la determinación de un conjunto de rutas, cada una realizada por un único vehículo que comienza y termina en su propio almacén, tal que todos los requerimientos de los clientes son abastecidos y las restricciones operacionales son satisfechas, y el costo global de transporte es minimizado.

2.1. Principales componentes de VRP

Las variaciones de este problema están consideradas al tener diferentes restricciones operacionales que pueden imponerse en la construcción de rutas y los posibles objetivos alcanzados en la optimización de los procesos. Los principales componentes son:

- Red de caminos
- Clientes
- Almacenes
- Vehículos
- Conductores

La red de caminos, utilizada para la transportación de bienes, se describe generalmente por medio de un grafo cuyos arcos representan las secciones de camino y cuyos vértices corresponden a la conjunción de caminos y a la localización de almacenes y clientes.

Los arcos pueden ser dirigidos o no dirigidos, si presentan ambas direcciones o solo una. Cada arco es asociado con el costo, que generalmente representa su longitud, y un tiempo de viaje que posiblemente

depende del tiempo de vehículo o del periodo durante el cual el arco es atravesado.

Típicas características de clientes son:

- a. Vértice del grafo de caminos en el cual se localiza el cliente;
- b. Cantidad de bienes (demanda), posiblemente de diferentes tipos, la cual debe de ser entregada o colectada al cliente;
- c. Periodos del día (ventanas de tiempo) durante los cuales el cliente puede ser atendido;
- d. Tiempos requeridos para entregar o coleccionar los bienes en la posición del cliente que posiblemente dependen del tipo de vehículo y
- e. Subconjunto de los vehículos disponibles que se pueden usar para servir al cliente.

En ocasiones no es posible satisfacer completamente la demanda de cada cliente, entonces, las cantidades que serán entregadas o colectadas se pueden reducir, o un subconjunto de clientes puede no ser atendidos. Para trabajar con estas situaciones, diferentes prioridades, o penalizaciones asociadas con la parcial o total falta de servicio, pueden ser asignadas a los clientes. Las rutas realizadas para servir clientes comienzan y terminan en uno o más almacenes, localizados en los vértices del grafo de caminos. Cada almacén se caracteriza por el número y tipos de vehículos asociadas con el y por el monto global de bienes que este puede ofrecer.

La transportación de bienes se realiza usando una flota de vehículos cuya composición y tamaño puede ser fija o definida de acuerdo a los

requerimientos de los clientes. Las características típicas de los vehículos son:

- a. Almacén base del vehículo, y la posibilidad de finalizar el servicio en un almacén distinto;
- b. Capacidad del vehículo, expresada como el peso máximo, volumen o número de pallets (plataformas de carga), que el vehículo puede cargar;
- c. Posible subdivisión del vehículo en compartimientos, cada uno caracterizado por su capacidad y el tipo de bienes que puede llevar;
- d. Dispositivos disponibles para las operaciones de carga y descarga;
- e. Subconjunto de arcos del grafo de caminos que pueden ser recorridos por el vehículo; y
- f. Costo asociado con la utilidad del vehículo (por unidad de distancia, por unidad de tiempo, por ruta, etc.).

Las rutas deben satisfacer varias restricciones de operación, las cuales dependen de la naturaleza de los bienes transportados, del nivel de calidad del servicio, y de las características de los clientes de vehículos. Restricciones de precedencia pueden imponerse debido al orden en que los clientes de una ruta son visitados.

La evaluación de los costos globales de las rutas y la revisión de las restricciones operacionales que se les imponen, requieren el conocimiento del costo de viaje y tiempo de viaje entre cada par de clientes y entre almacenes y clientes. Para este último, el grafo de caminos original (que casi siempre es muy esparcido) generalmente se transforma en un grafo completo cuyos vértices son los vértices del grafo de caminos correspondientes a los clientes y a los almacenes.

El tiempo de viaje t_{ij} asociado con cada arco (i, j) del grafo completo es calculado como la suma de los tiempos de viaje de los arcos pertenecientes a la ruta más corta de i a j en el grafo de caminos. De tal forma que se maneja una grafica completa asociada, la cual puede ser dirigida o no dirigida dependiendo de que las correspondientes matrices de costo y de tiempo de viaje sean simétricas o asimétricas respectivamente.

Varios objetivos se pueden considerar en VRP, los típicos son:

- A. Minimización de los costos globales de transporte, que dependen de la distancia global recorrida (o del tiempo de viaje global) y de costos fijos asociados con el uso de vehículos (y sus conductores);
- B. Minimización de numero de vehículos (o chóferes) requeridos;
- C. Balanceo de rutas, para tiempo de viaje y vehículo cargado;
- D. Minimización de penalizaciones asociadas con servicio parcial a los clientes o una consideración ponderada de esos objetivos.

En algunas aplicaciones, cada vehículo puede operar más de una ruta en el periodo de tiempo, o las rutas pueden durar más de un día.

Es necesario considerar versiones estocásticas o de tiempo dependiente dinámico, por ejemplo, problemas para los cuales, a priori, ahí se conocen parcialmente las demandas de los clientes o los costos (y los tiempos de viaje).

El VRP fue introducido en 1959 por Dantzig y Ramser quienes entonces presentaron su formulación matemática y el algoritmo para su

solución. En 1964 Clarke y Wright proporcionaron una heurística que mejoró la aproximación de Dantzig y Ramser.

Un caso particular de VRP surge cuando únicamente un vehículo está disponible en el almacén y no se imponen restricciones adicionales, por ejemplo, el Problema del Agente Viajero (TSP).

Las principales variantes de VRP son:

- I. VRP Capacitado (CVRP)
- II. VRP con Distancia Restringida (DCVRP)
- III. VRP con Ventanas de Tiempo (VRPTW)
- IV. VRP con Backhauls (VRPB)
- V. VRP con Entregas y Colectas (VRPPD)

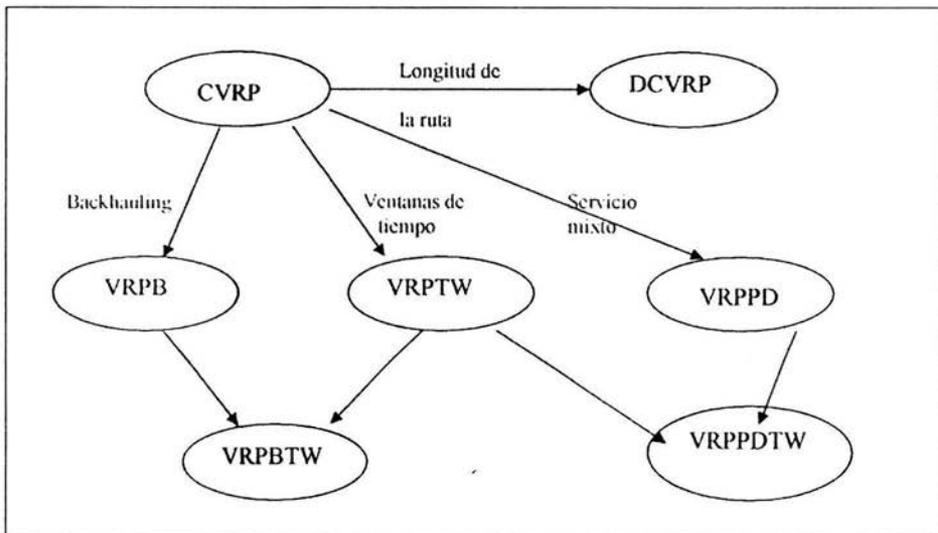


Figura 3¹².

¹² Fuente: Render, B. & Stair R., *Quantitative Analysis for Management*, Prentice Hall, 1997.

Se han desarrollado muchos algoritmos exactos frecuentemente apoyados por métodos heurísticos, como el modelo de programación lineal para el ACVRP, que se explica a continuación.

2.2 Modelo de P.L. para el ACVRP

El CVRP se puede describir como el siguiente problema de teoría de graficas (redes).

Sea $G(V,A)$ una grafica completa, donde $V=\{0,\dots,n\}$ es le conjunto de vértices y A es el conjunto de arcos.

Los vértices $i = 1,\dots,n$ corresponden a los clientes, donde el vértice 0 corresponde al almacén.

Un costo no negativo c_{ij} es asociado con cada arco $(i, j) \in A$ y representa el costo de viaje gastado por ir del vértice i al j .

Cada cliente i ($i = 1,\dots,n$) es asociado con una demanda conocida no negativa, d_i , que debe entregarse, y el almacén tiene una demanda ficticia $d_0 = 0$.

Un conjunto de K vehículos idénticos, cada uno con capacidad C_c está disponible en el almacén. Para asegurar la factibilidad asumimos que:

$$d_i \leq C$$

para cada $i = 1,\dots,n$.

El modelo es una formulación de flujo doble-indexado que usa n^2 variables binarias x para indicar si un vehículo atraviesa un arco en la solución óptima.

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } (i, j) \in A \text{ en la solución óptima} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$\text{Minimizar } \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} x_{ij}$$

$$\text{Sujeto a } \sum_{i \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V \setminus \{0\}$$

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0\}$$

$$\sum_{i \in V} x_{i0} = K$$

$$\sum_{j \in V} x_{0j} = K$$

Para evitar la formación de subtours se puede utilizar una familia de restricciones de cardinalidad polinomial llamadas restricciones de eliminación de subtours propuestas para el TSP y extendidas al ACVRP:

$$\alpha_i - \alpha_j + cx_{ij} \leq c - d_j \quad \forall i, j \in V \setminus \{0\}, i \neq j, \text{ tal que } d_i + d_j \leq c$$

2.3. El enfoque cuantitativo

El enfoque cuantitativo de los problemas logísticos no es solo elegir el modelo matemático adecuado, proporcionar datos y obtener un resultado. El método cuantitativo llevado de forma estricta exige la aplicación de pasos secuenciales con el fin de garantizar el uso apropiado de los modelos y que incluyan criterios de revisión de resultados con el objetivo de descartar posibilidades de equivocaciones o interpretaciones erróneas. En la figura 4 se muestra la propuesta típica del enfoque cuantitativo.

En la parte superior de la figura 4 esta ubicado “Investigación de Operaciones/Ciencias Administrativas”, que es el área donde estos modelos son más utilizados. El paso inicial del enfoque cuantitativo es la descripción del problema, esta parte quizás es la más esencial para tener resultados que puedan ser útiles; una buena descripción del problema es un comienzo excelente para identificar las causas más probables del mismo y profundizar en las posibles soluciones. Para que el planteamiento del problema sea razonable se necesita la participación activa de quienes conocen a fondo el sistema logístico de interés, ya que al aportar su conocimiento y experiencia contribuyen a localizar las variables cuantitativas relevantes en la definición del problema.

El segundo paso, “desarrollo de un modelo”, es importante la participación del personal que tenga conocimiento de los procesos logísticos de la empresa para tener variantes de un mismo problema, ya que el mismo problema puede verse con diferentes enfoques, se debe elegir el modelo adecuado, esto dependiendo de la parte de la cadena logística que se quiera mejorar, por ejemplo, se puede dirigir a minimizar el costo total de la operación, donde los modelos de optimización se adaptan perfectamente,

para optimizar el nivel de servicio, los tiempos de entrega o el manejo flotas vehiculares, los modelos de transporte, trasbordo y diseño de rutas serian más apropiados.

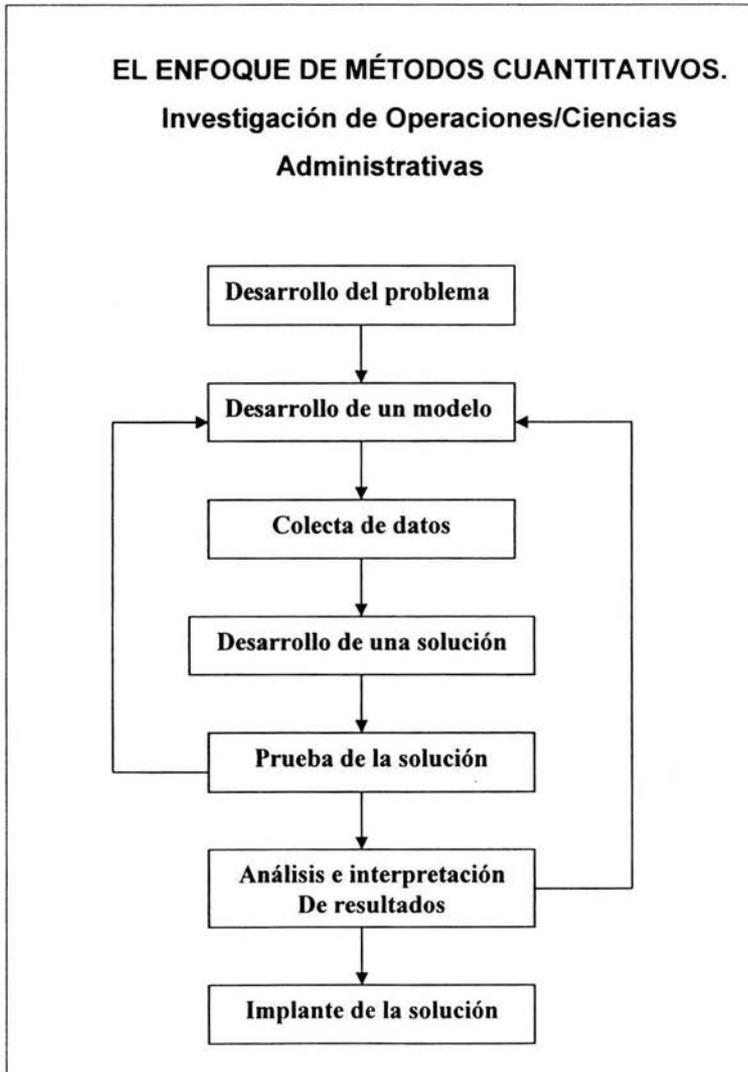


Figura 4¹³.

¹³ Render, B. & Stair R., *Quantitative Analysis for Management*, Pretince Hall, 1997.

Independientemente del enfoque dado al problema el modelo debe ser realista y contar con un proceso de solución, debe ser sencillo de modificar y entender, contar con datos de entrada que se requieren en el proceso de solución.

El tercer paso es la “colecta de datos”, necesario para llegar a resultados útiles. Para alcanzar una representación matemática buena y adecuada del problema se deberán contar con datos para alimentar al modelo. La ubicación de datos que afectan de manera directa al problema logístico agrega un poco más de dificultad a la colecta de datos. Por ejemplo en muchos casos, aún cuando ya se tienen los datos, el análisis en la práctica se llega a omitir aspectos como variaciones en los tiempos de recorrido de los vehículos, variaciones en los niveles de producción, la programación de la plantilla de operadores de vehículos o aspectos de pronósticos de demanda. Logrando un consenso sobre los datos necesarios, es importante que tengan una razonable precisión, ya que aún teniendo un modelo que represente finalmente el sistema real, el uso de datos equivocados dará resultados sin ningún valor. Aquí cabe recordar el principio de “basura que entra, basura que sale”, invocado por los diseñadores de software, para enfatizar la importancia de contar con datos e interpretaciones correctos.

El cuarto paso, “desarrollo de una solución”, es quizá el más común en la aplicación de la metodología cuantitativa. Actualmente, con la difusión de las computadoras y el desarrollo de software especializado, el proceso de una solución generalmente se reduce a efectuar las corridas necesarias para llegar a los resultados. En esta fase entran también condiciones relativas a la rapidez con la que una computadora puede resolver los

problemas, aspecto conocido como complejidad computacional de los algoritmos.

El quinto paso es “prueba de la solución”, y como depende de los datos utilizados tanto del modelo se deben verificar ambos. Una forma de probar los datos, es obtener referencias adicionales de otras fuentes, como pueden ser los antecedentes originales que se obtuvieron de registros históricos, tal vez nuevos datos que se obtengan de entrevistas, mediciones directas o muestreos. Pueden realizarse pruebas estadísticas para verificar si las variaciones encontradas son significativas, si este fuese el caso se deberá tratar de llegar a informes más acertados.

Si los datos ya son razonablemente precisos, entonces se verifica que las soluciones que da el modelo sean consistentes con el contexto del problema. En caso de existir inconsistencia, se deberá realizar un esfuerzo para corregir la lógica y las suposiciones en las que se basaba el modelo, con la finalidad de lograr una representación más sensata del sistema de interés.

2.4. Uso eficiente de vehículos

Una vez ya establecidas las posibilidades sobre el uso de los caminos por donde se moverá la carga, el siguiente elemento a considerar para una buena distribución física es el uso de los vehículos que harán el transporte. Las estrategias para mover la carga pueden definirse como políticas que orientan la actividad logística a fin de lograr los objetivos de un manejo eficiente de la cadena. En particular, al administrar la flota disponible para mover las cargas solicitadas en la cadena logística, se puede elegir diversas

opciones sobre el modo de organizar las rutas de los vehículos o la manera de recoger o almacenar la carga. Algunos ejemplos de estrategias comunes en la práctica logística se presentan a continuación¹⁴:

1) Consolidación de carga

La finalidad de consolidar la carga es para que los transportistas optimicen el uso de los vehículos disponibles, esta acción se ha convertido en una estrategia para ser competitivo ya que ayuda a la planeación de embarques.

Los embarques que se mueven en la cadena logística pueden en principio ser enviados independientemente, pero si se combinan entre sí, pueden aprovechar las instalaciones y el equipo de mejor manera, incidiendo tal vez en economías de escala. Para ello, las cargas individuales se aglutinan o “consolidan” en cargas mayores, las cuales posteriormente son fragmentadas para llegar a sus destinos originales.

La consolidación puede hacerse por medio de:

- a) El ruteo de vehículos: Los embarques individuales se combinan para compartir los recursos de transporte disponibles, haciendo colecta o entrega en diversas paradas.

- b) El uso de un almacén central: Los embarques individuales se llevan primero a un almacén central, formando embarques mucho más grandes que puedan aprovechar las economías de escala de otros

¹⁴ Ratliff H.D. & Nulty W.G., *Logistics Composite Modelling*, The Logistics Institute at Georgia Tech, 1996.

modos de transporte como los tractocamiones de carro entero o el ferrocarril.

- c) La secuencia de itinerarios: ajustando el inicio y el término de los itinerarios en las rutas ya diseñadas, se puede usar un mismo vehículo, agrupando varios embarques a manejar a lo largo del día en dicho vehículo.

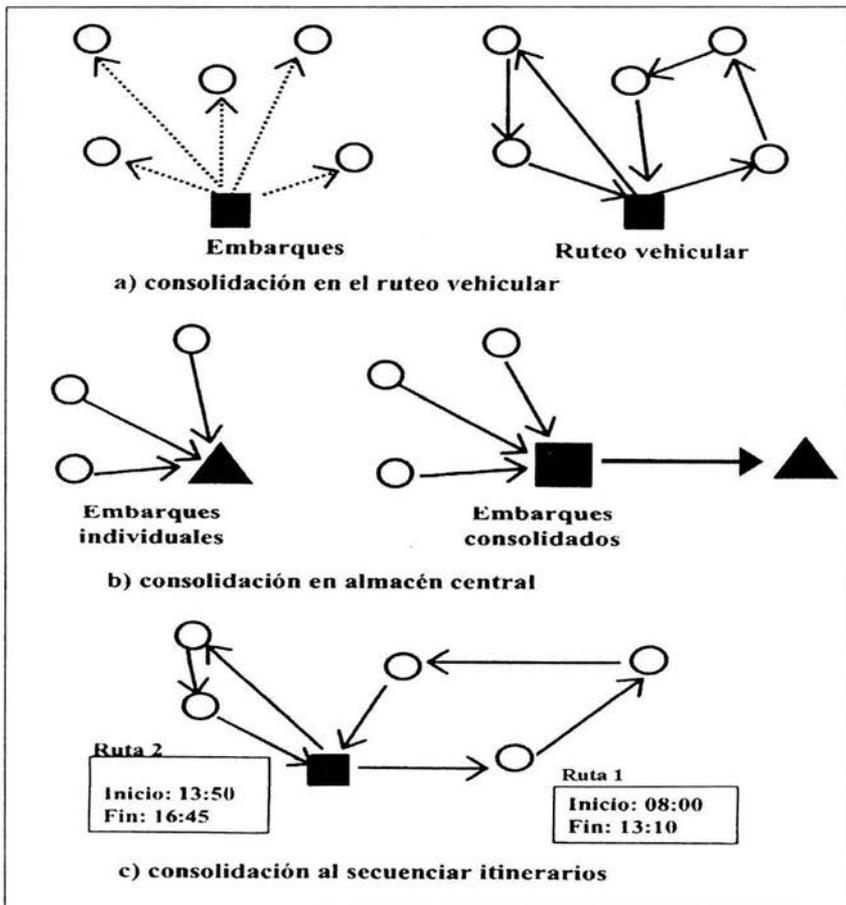


Figura 5¹⁵. Consolidación de carga.

¹⁵ Adaptado de: Ratliff H.D. & Nulty W.G., *Logistics Composite Modelling*, The Logistics Institute at Georgia Tech, 1996.

2) Integración de la logística de colecta y distribución

Lo que se busca es agrupar en una sola tarea las actividades logísticas de la empresa referentes a la compra de insumos, abasto de la planta de manufactura y la distribución de producto terminado, mezclando las distintas actividades en una sola, ya que comúnmente estas actividades se llevan a cabo por separado, el objetivo es optimizar el uso del vehículo, tratando de evitar que el vehículo viaje vacío.

Esto requiere de un esfuerzo extra pues repercutirá de manera directa en el diseño de rutas vehiculares que ya se tengan establecidas pero esto ayudara al uso óptimo de los recursos disponibles.

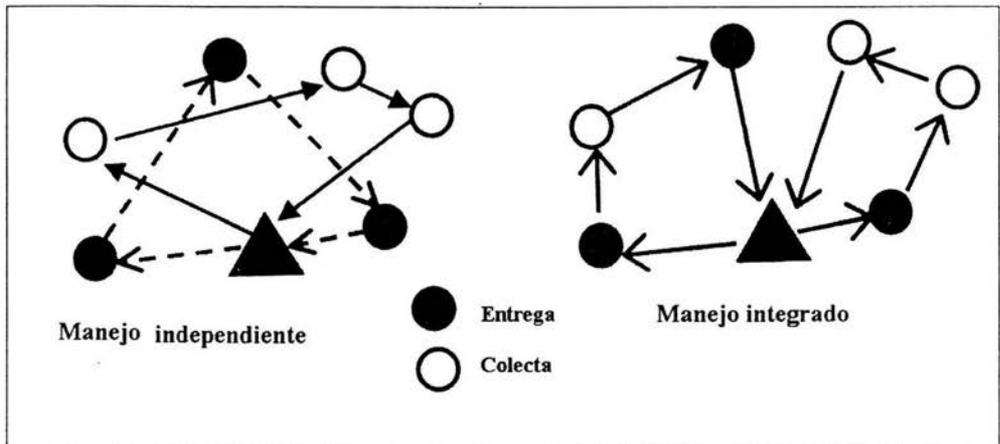


Figura 6¹⁶. Integración logística de colecta y entrega.

¹⁶ Adaptado de: Ratliff H.D. & Nulty W.G., *Logistics Composite Modelling*, The Logistics Institute at Georgia Tech, 1996.

3) Rutas fijas y rutas dinámicas

El movimiento de la flota puede hacerse sobre rutas fijas o sobre rutas variables.

Las rutas fijas y las rutas principales son las que se manejan por servicio regular de la flota y que generalmente se han diseñado con base en la demanda observada a lo largo del tiempo. Las rutas fijas se usan de manera regular, sin tener influencia alguna de la demanda real sobre la cadena logística; las rutas principales o maestras se usan con los ajustes pertinentes derivados de la demanda real que se presente.

Las rutas variables, al contrario de lo anterior, se ajustan completamente a la demanda presente en el sistema logístico, en el caso más extremo, las rutas dinámicas se ajustan continuamente sobre la marcha misma del vehículo.

Algunas ventajas comparativas de estos tipos de rutas son:

- a) Fijas: son sencillas de manejar y los operadores tienen más familiaridad con los clientes y áreas de servicio.

- b) Variables: requieren más equipo de apoyo, su adaptación a la demanda y los cambios de último momento, les permiten un uso más intenso y un mejor aprovechamiento de los recursos en la distribución.

4) Rutas de movimiento continuo

El ruteo de movimiento continuo es realizar más de una actividad con un solo vehículo, esto es, que se debe coordinar la actividad de los vehículos que salen de la planta con los vehículos que entran de tal manera que sea uno solo que realice estas actividades.

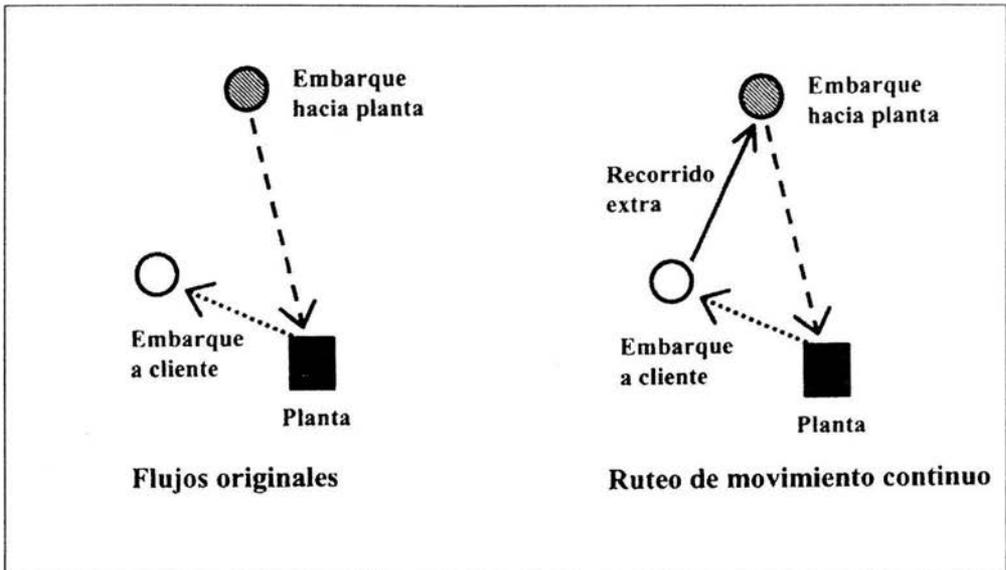


Figura 7¹⁷. Ruteo de movimiento continuo.

El ruteo de movimiento continuo permite un uso más intenso de los vehículos y de la plantilla de chóferes, además que reduce el movimiento de vacíos. Este procedimiento es ventajoso siempre que el coste de recorrido extra para ir a las instalaciones del proveedor de un costo total al movimiento continuo menor que los costos de los flujos originales.

¹⁷ Adaptado de: Ratliff H.D. & Nulty W.G., *Logistics Composite Modelling*, The Logistics Institute at Georgia Tech, 1996.

2.5. Pautas para diseño de rutas vehiculares

El diseño de rutas para una flota vehicular es, en general, mucho más complejo que el problema del agente viajero, puesto que las restricciones de interés pueden incluir la capacidad de los vehículos, limitaciones a la cantidad de kilómetros que puede recorrer cada vehículo, limitaciones al tiempo en que puede estar operando el vehículo.

Las restricciones tratan de reflejar aspectos reales de operación, como pueden ser el tipo de vehículo usado a las cargas de trabajo para los chóferes de la flotilla. Antes de intentar un manejo del problema como modelos cuantitativos, conviene echar una mirada a la parte originada en la práctica del despacho de vehículos de carga.

La experiencia de un gran número de operadores logísticos y despachadores de carga, ha desarrollado con el tiempo ocho principios básicos que orientan para el desarrollo de prácticas de ruteo.

Las recomendaciones de estos principios, que se refieren a vehículos partiendo de un depósito central para hacer entregas a diversos clientes para regresa a su base al terminar el día, son las siguientes:

Principio 1: Es conveniente cargar los vehículos procurando que las paradas de entrega estén lo más cercanas posible entre sí. Al tener rutas organizadas alrededor de conglomerados de paradas, se minimizan los viajes entre las paradas y los tiempos totales en las rutas.

Principio 2: Conviene organizar la entregas a lo largo de la semana, de modo que se formen rutas separadas para cada día de la semana. Las

rutas tomadas para cada día deben evitar hasta donde se pueda el traslape de sus conglomerados de paradas, de modo que se reduzca lo más posible la repetición de recorridos.

La figura 8 muestra el ejemplo. En el primer caso se ve que la ruta para entrega A se cruza con la ruta para la entrega de B; en el caso mejorado, las entregas se separan para atender en días distintos conglomerados distintos, reduciendo los cruces y por tanto la repetición en el recorrido de tramos.

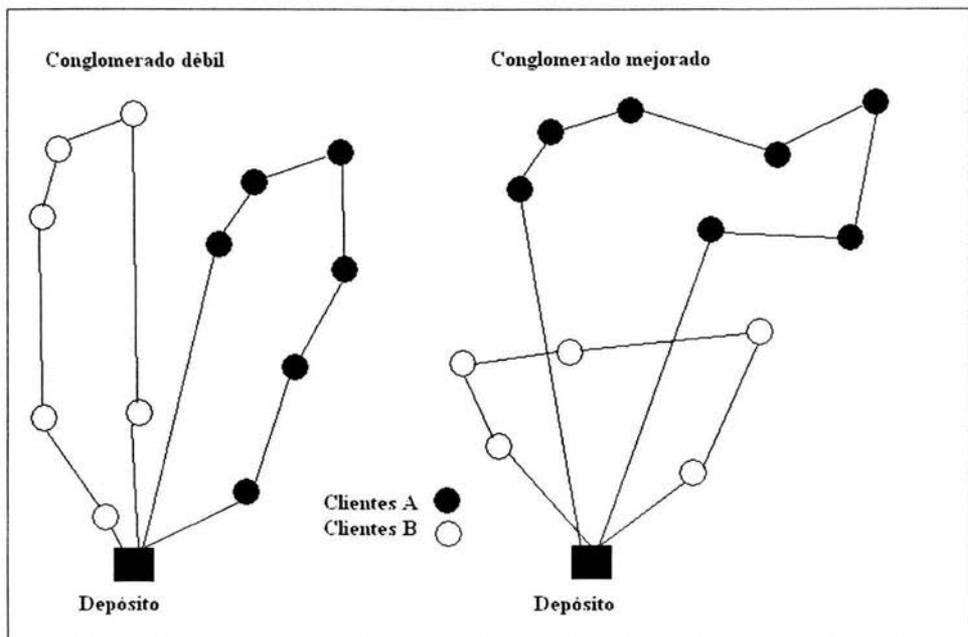


Figura 8¹⁸. Formación de conglomerados de paradas.

Principio 3: Al armar las rutas, conviene iniciar con la parada más lejana del depósito central. Rutas eficientes se pueden generar formando conglomerados de paradas alrededor del destino más alejado del depósito.

¹⁸ Fuente: Ballou R., *Business Logistics Management, 4th edition*, Prentice-Hall, USA, 1999.

Una vez identificada esta parada, se emplea el vehículo con la mayor capacidad disponible y se forma un conglomerado de paradas lo más apretado posible alrededor de la primera parada, hasta que se llene la capacidad del vehículo. El siguiente paso es seleccionar la siguiente parada más alejada, luego el siguiente vehículo disponible con la mayor capacidad y forma un nuevo conglomerado. Prosiguiendo de esta manera, se completa la formación de rutas, empleando los vehículos con menor capacidad para las entregas más cercanas al depósito.

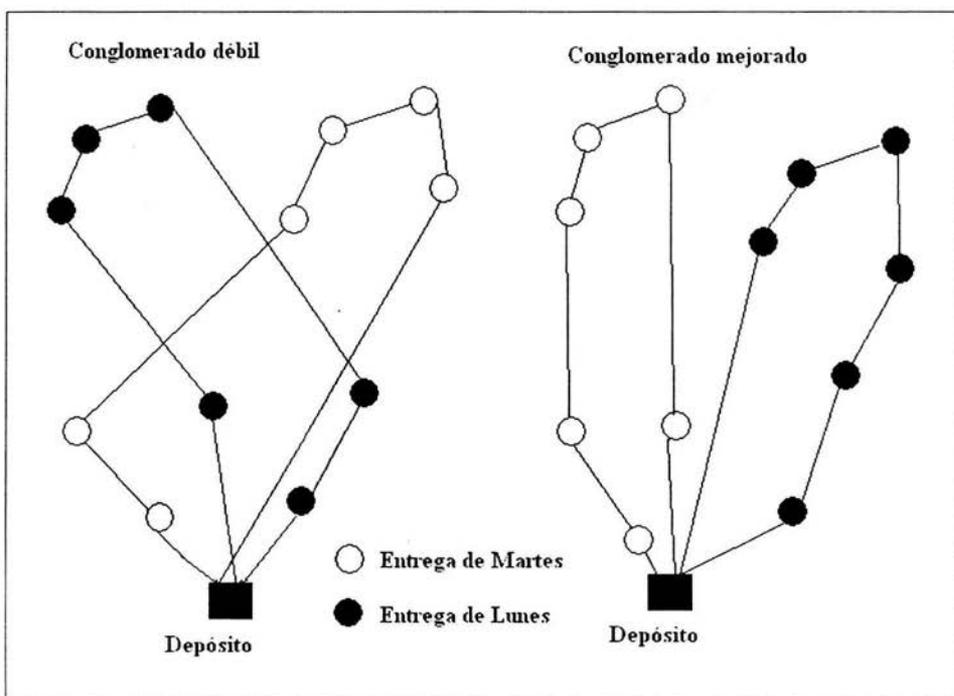


Figura 9¹⁹. Formación de conglomerados por día de entrega.

Principio 4: Al formar las rutas, se debe procurar hasta donde sea posible que la secuencia de paradas en la ruta forme un patrón de gota. Lo

¹⁹ Fuente: Ballou R., *Business Logistics Management, 4th edition*, Prentice-Hall, USA, 1999.

que se busca con este patrón es que las trayectorias de la ruta no se crucen entre ellas, logrando que el patrón formado por la ruta completa luzca como una gota. Tal sería el caso de un diseño de rutas del problema del agente viajero.

Principio 5: Las rutas más eficientes son las que usan los vehículos de la mayor capacidad disponible. En un caso ideal, un solo vehículo con suficiente capacidad para cubrir todas las paradas de la ruta, minimiza la distancia y el tiempo totales requeridos. Por tanto, los vehículos de la flota deben usarse en orden de mérito según su capacidad.

Principio 6: Puede resultar conveniente mezclar la colecta de cargas con las entregas hasta donde sea posible. La colecta debe intentarse, siempre que pueda, en el curso mismo de las entregas, esto ayuda a reducir el cruce de la ruta sobre sí misma, cuando la colecta es posterior a las entregas. El grado en que esto puede hacerse depende del tipo de vehículo, los volúmenes de colecta y los posibles bloqueos que la colecta acumulada pueda hacer a los embarques por entrega dentro del vehículo.

Principio 7: Cuando se tienen paradas que se encuentran demasiado apartadas de los conglomerados del resto de paradas, se sugiere considerar un medio alternativo de entrega. Las entregas que resultan demasiado alejadas de los conglomerados del resto de paradas normalmente servidas implican mayores costos de servicio. El uso de vehículos pequeños para atender esas paradas o la subcontratación pueden ser mejores opciones.

Principio 8: Las ventanas de tiempo estrechas deberían evitarse. Las ventanas de tiempo estrechas que se impongan a las paradas, pueden

alejarse del diseño de la ruta del patrón ideal del servicio. Es algo común que las ventanas del tiempo no sean completamente rígidas, por lo que las paradas que presionen al servicio distorsionando la ruta deberían renegociarse con los clientes a fin de tener mayor holgura.

Los principios mostrados se pueden difundir muy fácilmente entre el personal operativo que se encarga de las tareas de ruteo y despacho; aunque no generan soluciones matemáticamente óptimas como lo hiciera un modelo, producen resultados prácticos razonablemente buenos y con gran rapidez.

2.6. Uso eficiente del camino

Los problemas relacionados con la distribución física de carga, de forma obligada tienen que enfrentar la situación de utilizar los caminos disponibles por los que circularán los vehículos encargados de la distribución.

Los caminos son un elemento de la distribución física que no es posible cambiar a conveniencia del operador de transporte, pero la manera en que estos se recorren si se pueden cambiar por el transportista y dependiendo de esto los resultados de operación serán diferentes.

Las características más comunes que se identifican en un camino son: longitud de recorrido, tiempo de recorrido, costo de recorrido o capacidad de flujo, estas se manejan en tres modelos básicos que tiene que ver con la generación de rutas de distribución.

En una descripción básica, estos modelos abordan el problema de buscar rutas que vayan de un origen o un destino, o de varios orígenes o varios destinos, aprovechando de la mejor manera posible las características del camino. Estos modelos son:

- a) Ruta más corta
- b) Modelo de transporte
- c) Problema del agente viajero

Más adelante se tratarán a detalle estos métodos.

3. Análisis de los métodos de solución de problemas de distribución.

Para realizar el proceso de transporte de mercancías y los recorridos que han de realizarse de forma eficiente, hay una gran variedad de métodos de solución, pero hay algunos métodos que se pueden adaptar mejor a cada caso, el problema de distribución puede tener una infinidad de variantes y estas pueden ser:

- Seleccionar el modo o medio de transporte adecuado
- Establecer el tamaño óptimo de la flota vehicular
- La determinación de las rutas que deben recorrer los vehículos al realizar las entregas.

Se debe ser cuidadoso al seleccionar el método para resolver el problema, saber cuales son sus ventajas y desventajas al emplearlos esto debido a que no se cuenta con un método universal que pueda con las variaciones y restricciones de cada caso.

En el caso cuando el número de vehículos es fijo, el problema consiste en determinar las rutas de costo mínimo de los vehículos bajo ciertas restricciones; estas pueden ser sobre la satisfacción de la demanda, la capacidad de carga de los vehículos, el tiempo de servicio, o la distancia (o tiempo) total recorrida(o) por cada vehículo. Problemas de este tipo son conocidos como Problema de Transporte (este caso será especialmente estudiado en este trabajo).

Si un modelo matemático de un problema es tan complicado, que es difícil o quizás imposible encontrar una solución, y no puede ser simplificado adecuadamente, entonces es recomendable usar un algoritmo heurístico, ya que este produce con eficiencia buenas soluciones aproximadas para el problema. Un procedimiento heurístico recurre a la intuición, pero puede garantizar sus resultados (si los hay) estadísticamente o dentro de ciertos márgenes de incertidumbre. Existen algoritmos heurísticos para la determinación de rutas, bajo restricciones de tiempo o de capacidad, cumpliendo con la demanda. Algunos de los más conocidos son:

- Algoritmo para el Problema del Agente Viajero, S. Lin y B. Kernighan (1973).
- Algoritmo exacto para el Problema de Rutas de Vehículos, N. Christofides (1980).
- Aproximación geométrica para resolver el Problema del Agente Viajero J. P. Norback y R. F. Love (1977).
- Algoritmo para problemas de Flujo a Costo Mínimo, Busacker y Gowen.

3.1. El modelo de la ruta más corta

El modelo de la ruta más corta representa de forma gráfica una red de caminos por la que circulan los vehículos encargados de la distribución, lo que describe el modelo son localidades que se deben visitar y la distancia del camino de una localidad a otra, las localidades son representadas por un conjunto de nodos, y el camino a recorrer es un conjunto de arcos. Un ejemplo típico se muestra en la figura 10, los nodos son pequeños círculos y los arcos son segmentos de recta que unen a los nodos. Los nodos se

pueden representar en la grafica por medio de letras con el fin de llevar un orden, la numeración en los arcos representa la distancia que entre localidades.

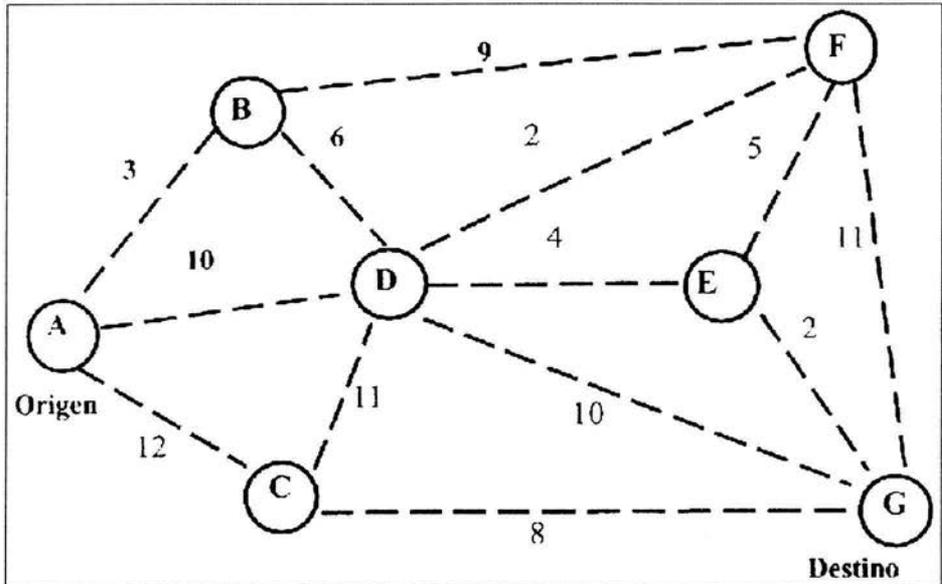


Figura 10.

El problema de la ruta más corta se enfoca en encontrar el camino de menor distancia en la red, para así realizar el trayecto del origen hacia el destino economizando en la distancia recorrida.

Cuando las redes de caminos resultan demasiado grandes para una inspección visual, hay varios algoritmos para encontrar la ruta más corta, que funcionan con gran eficiencia y que resultan sencillos de programar. Uno de los más antiguos, pero no menos eficiente, es el conocido algoritmo de Dijkstra, nombrado así en la memoria de su autor. Este algoritmo inicia

en el nodo origen y siguiendo el criterio “de mejor opción”, va construyendo la mejor ruta para llegar al destino, resolviendo (o sea, agregando nuevos nodos a la ruta) hasta que alcanza el nodo final.

Los pasos a seguir en el algoritmo de Dijkstra son los siguientes:

Paso 1: se inicia en el nodo origen (con distancia acumulada 0). El próximo nodo a conectar en la ruta es aquel que aporta el mínimo a la distancia acumulada y se le etiqueta para distinguirlo. Se tienen ya dos nodos resueltos.

Paso 2: dos de los nodos que es posible alcanzar desde nodos ya resueltos, se agrega a la ruta aquel que aporta el mínimo de distancia acumulada. Se etiqueta el nuevo nodo con la distancia acumulada, con lo que se tiene un nuevo nodo resuelto.

Paso 3: si se ha llegado al nodo destino, terminar. En otro caso repetir paso 2.

Ventajas:

Este problema puede resultar muy sencillo para casos de redes pequeñas, donde un simple análisis visual permite encontrar una red de longitud mínima.

El algoritmo de la ruta más corta en las aplicaciones prácticas generalmente se corre con algún programa de computadora, el cual favorece en una mayor rapidez y exactitud en su solución.

Por lo tanto un primer paso para una exitosa aplicación de la ruta más corta es contar con una buena representación de la red de caminos en la que se pretende utilizar, mientras más precisa representación de la red de caminos, más realista será la solución aportada por el algoritmo.

Desventajas:

Para redes de caminos muy grandes resulta muy difícil su aplicación ya que requerirá de un programa de cómputo con capacidad de más de 100 ciudades o localidades.

3.2. El modelo de transporte

En una empresa ya sea transportista o que dependa su actividad del transporte como es el caso de empresas que elaboran productos de consumo masivo, parecería problemático estar representando de forma matemática cualquier decisión operativa, el problema de transporte se ha mantenido en la literatura de investigación de operaciones desde la década de los años 1940²⁰, y no tratando de abarcar el sin número de problemas que se presentan en dicha actividad, pero si tratando de cubrir aspectos en particular del transporte, ya sea tratar de proveerse de alguna materia prima necesaria o repartir producto terminado a distintos puntos de venta. El problema de transporte representa gráficamente el centro de consumo que indica la demanda y el proveedor que se refiere a la capacidad de abastecimiento del producto, el objetivo es minimizar el costo de satisfacer la demanda en los centros de consumo si rebasar las capacidades de los proveedores.

²⁰ Problema propuesto por primera vez en el trabajo de F. L. Hitchcock, *The Distribution of a Product from Several Sources to Numerous Locaties*, publicado en el Journal of Matematics and Physics, en 1941.

Matemáticamente el problema de transporte puede resolverse por programación lineal (método simplex) pero, de acuerdo a su estructura especial, es más eficiente otro tipo de métodos.

Entre los procedimientos más usados se encuentran el Método Húngaro y el de Stepping Stone (o método simplex de transporte); este último usa a su vez la regla del extremo noroeste o el método de vogel para obtener una solución inicial factible.

Las ventajas que tiene el método simplex de transporte comparado con el simplex tradicional son las siguientes:

- 1) El tiempo de cómputo promedio es 100 veces más rápido que en el método simplex.
- 2) Utiliza menos memoria en el cómputo, lo que facilita el tratamiento de problemas grandes.
- 3) Genera soluciones enteras cuando los datos de demanda y oferta son enteros lo cual es importante cuando los bienes a distribuir son unidades indivisibles (automóviles, refrigeradores o televisores).

El problema de transporte se plantea como sigue:

Sea x_{ij} = Número de unidades del producto que deben enviarse del origen i ($i = 1, \dots, m$) al destino j ($j = 1, \dots, n$).

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

$$\text{s.a.} \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i \quad i = 1, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \quad j = 1, \dots, n$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n$$

Donde:

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j,$$

m es el número de orígenes

n es el número de destinos

a_i es la oferta (en unidades de producto) del origen i ,

b_j es la demanda (en unidades de producto) del destino j , y

c_{ij} es el costo de enviar una unidad del origen i al destino j

El problema consiste en determinar el número de unidades de producto que deben ser transportados en cada ruta, a costo mínimo, de tal modo que sea satisfecha la demanda de los centros de consumo de acuerdo a la oferta de los orígenes. Este problema incluye varias rutas, cada una va de un origen i a un destino j , sin pasar por puntos intermedios.

En general las etapas del algoritmo de solución al problema de transporte se pueden establecer de la siguiente manera:

a) Encontrar una solución factible (hay tres métodos, inspección, esquina noroeste y voggel).

b) Probar si la solución es no degenerada, esto es, cumplir con:

$$(m + n - 1) = \text{al número de asignaciones } (x_{ij} > 0).$$

c) Probar si la solución encontrada es óptima.

d) Modificar la solución y regresar al paso b.

La figura 11 muestra un ejemplo del problema de transporte.

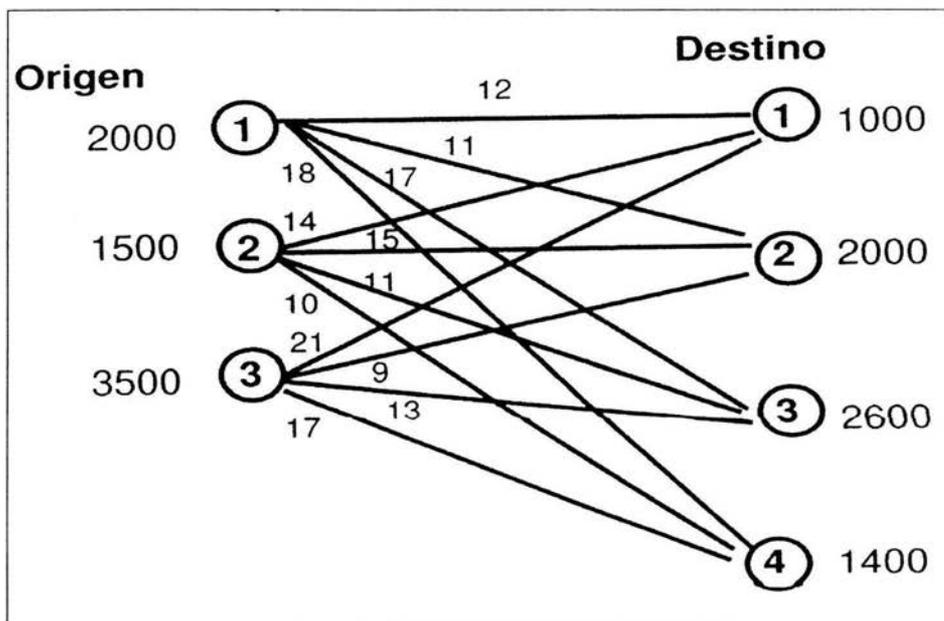


Figura 11. Problema de transporte.

El objetivo de este tipo de solución de problemas es distribuir carga o mercancía de un origen a un destino tratando que el costo total de transporte sea el mínimo posible, el tipo de datos que maneja este modelo son las cantidades de carga disponibles, demanda solicitada y los costos unitarios de transporte entre orígenes y destinos.

Las cantidades de carga disponibles se indican sobre los nodos de origen, sobre los nodos destino se coloca la cantidad de demanda solicitada

y el costo unitario de transporte se indica sobre los arcos que unen estos nodos. Por ejemplo, en la figura se ve que el origen 1 dispone de 2000 unidades, el destino 3 solicita 2600 unidades y el costo de enviar cada unidad de carga del origen 1 al destino 3 es de \$ 17. 00. Otra forma de representar el problema de transporte es la forma tabular, en este formato se condensa la información de disponibilidad de carga, demanda y costos unitarios de transporte.

	HACIA				
DESDE	Destino1	Destino2	Destino3	Destino4	Disponible
Origen1	12	11	17	18	2000
Origen2	14	15	11	10	1500
Origen3	21	9	13	17	3500
Requerido	1000	2000	2600	1400	

Tabla 8. Formato tabular para el problema de transporte.

La tabla 8 representa el problema de la figura 11. Los números que aparecen enmarcados dentro de cada casilla indican el costo unitario de mover carga desde el origen hasta el destino. De este modo en la tabla se lee un costo de \$15.00 por cada unidad de carga movida del origen 2 al destino 2. Las disponibilidades de carga en los orígenes se leen en la columna del extremo derecho de la tabla, y las demandas de cada destino se leen en el último renglón de la tabla.

La suma de demandas y de orígenes debe estar balanceada en este caso la suma de demandas y de orígenes resulta igual, que es de 7000 unidades, cuando se presenta el caso de que no esta balanceada se agrega un renglón o columna ficticio.

Para arrancar el algoritmo de transporte, se requiere de una solución inicial factible, la cual se genera por varios métodos, como son; el del costo mínimo, el de inspección, el de voggel y el del elemento noroeste.

El método del costo mínimo consiste en comenzar por la casilla con el menor de los costos y asignar la carga a la correspondiente pareja origen-destino y así sucesivamente y así hasta satisfacer todas las demandas.

El método de inspección utiliza los costos de la matriz original y se asigna a las casillas de menor valor, de tal forma que no se violen las restricciones de demanda ni capacidad.

El método de voggel además de considerar a los costos de transporte, también toma en cuenta una penalización.

El método del elemento Noroeste es quizá el más conocido y consiste en los pasos siguientes:

1. Iniciar en la esquina superior izquierda de la tabla (noroeste).
2. Asignar carga a los destinos agotando la oferta del renglón en uso antes de bajar al siguiente renglón.

3. Asignar carga a los destinos completando toda la demanda antes de moverse al siguiente destino a la derecha de la tabla.

4. Verificar que las demanda y ofertas estén balanceadas.

Siguiendo estos pasos en el problema mostrado anteriormente, se tiene que en la tabla (tabla 9) inicial se lee el costo asociado a esta solución inicial: \$94,600.00.

DESDE	HACIA				Disponibles
	Destino1	Destino2	Destino3	Destino4	
Origen1	12	11	17	18	2000
Origen2	14	15	11	10	1500
Origen3	21	9	13	17	3500
Requerido	1000	2000	2600	1400	Costo Inicial
					\$ 94,600

Tabla 9.

A partir de la solución inicial, se procede a la mejora del objetivo del costo total. El algoritmo de transporte mejora la solución inicial, examinando las casillas no utilizadas, básicamente indagando lo que pasa con el costo actual si la unidad de embarque reasigna tentativamente a una ruta que no se está usando. Si el efecto reduce el costo, se usa esa nueva ruta hasta

agotar la posibilidad de envío y se actualiza la tabla. Este procedimiento se conoce como “método de la piedra rodante” (Stepping-stone method).

Así por ejemplo se ve que la ruta Origen2-Destino1 no se usa en la asignación original. Si Origen2 envía 1 unidad de producto a Destino1, entonces de enviarla a Destino2, y a la vez, Origen1 libera una unidad enviada a Destino2 para compensar. La tabla 10 ilustra esta posibilidad; las flechas indican la transferencia de una unidad de carga.

DESDE	HACIA			
	Destino1		Destino2	
Origen1		12		11
	...			
Origen2		14		15
	...			
Origen3		21		9
Requerido	1000		2000	

$$\text{Efecto en costo : } +14 -12 + 11 = -2$$

Tabla 10.

El efecto que esta transferencia tiene en el costo de transporte se calcula fácilmente sumando los costos de las casillas que admiten una unidad más de carga transferida y restando los costos de las casillas que transfieren la unidad. El cálculo se muestra en el último renglón de la tabla 10, resultando un costo negativo, por lo que sugiere usar esta transferencia hasta donde sea posible. De la misma tabla se puede ver que la

transferencia terminará al enviar la última unidad de la asignación Origen2-Destino2 (1000 unidades) hacia la casilla Origen2-Destino1, con lo cual la nueva asignación de cargas se vera como en la tabla 11.

DESDE	HACIA								Disponibles
	Destino1		Destino2		Destino3		Destino4		
Origen1		12		11		17		18	2000
Origen2	1000		1000		500				1500
Origen3		21		9		13		17	3500
Requerido	1000		2000		2600		1400		
Costo:									\$92,600
Costo total con Reglas Noroeste:									\$94,600

Tabla 11. Solución Mejorada

En esta ultima tabla, el costo se ha reducido en \$2,000 respecto al costo de la solución inicial.

El algoritmo de transporte se continúa hasta que no se encuentren casillas con rutas que mejoren los costos. Llegando a ese punto, se obtiene la solución óptima, mostrada en la tabla 12.

DESDE	HACIA							
	Destino1	Destino2	Destino3	Destino4	Disponibles			
Origen1	12	11	17	18	2000			
Origen2	14	15	11	10	1500			
Origen3	21	9	13	17	3500			
Requerido	1000	2000	2600	1400	3500			
Costo:								\$79,600
Costo total con Reglas								\$94,600
Noroeste:								

Tabla 12. Solución Óptima

3.3. El problema del agente viajero

El modelo del agente viajero (referido en la literatura inglesa como *Travel Salesman Problem*, TSP) tiene como finalidad diseñar la ruta en forma de circuito de modo que inicie y finalice el recorrido en el mismo punto, pasando así el supuesto agente viajero por los puntos a visitar intermedios recorriendo lo menos posible. Los vehículos de servicio son un ejemplo sencillo de TSP, como son los vehículos que realizan reparaciones en carreteras, recolectores de basura, etc. Este caso no toma en cuenta la capacidad de carga de los vehículos. Otro caso es el de vehículos que parten de un centro de distribución para repartir carga a diversos puntos y regresan al origen al terminar, aunque en este caso si puede ser de interés la capacidad de carga de los vehículos.

Este tipo de problemas ya han sido resueltos por distintos métodos en la investigación de operaciones, como son programación lineal o programación dinámica; se ha encontrado que en general se puede resolver satisfactoriamente para circuitos que contengan relativamente pocos puntos a visitar, no mayores de 100 nodos. La dificultad que presentan los problemas que sobre pasan dicho valor de nodos o puntos a visitar es que el tiempo que se invierte en desarrollar el algoritmo es muy grande aún en el caso que se cuente con equipos de computo actualizados, para este caso se pueden emplear algoritmos heurísticos²¹ ya existentes, los cuales brindan soluciones aceptables aún que no sean el óptimo matemático exacto se calculan con una buena rapidez.

En el caso en que el número de puntos a visitar es pequeño se debe iniciar inspeccionando el problema visualmente en el mapa de la zona que se va a recorrer aplicando dos principios básicos de la forma en que se debe iniciar el ruteo:

- a) Una ruta bien diseñada no se cruza por si misma.
- b) Siempre que sea posible, los arcos que forman la ruta presentan un patrón convexo, en forma de gota.

Con este par de principios básicos, se pueden diseñar rutas para el problema del agente viajero directamente sobre un mapa que represente los puntos a visitar así como los caminos que los conectan, siempre que se tenga una buena aproximación a las longitudes de los tramos que unen los

²¹ Los algoritmos heurísticos son métodos que buscan buenas soluciones, que si bien no son el óptimo ideal, están razonablemente cercanas a él. Estos métodos dan soluciones sensatas en tiempos breves, en comparación con métodos de optimización exacta que podrian tardar demasiado.

puntos. Estos principios han surgido de la aplicación práctica. En la figura 12 se muestra la forma que debe tener el diseño de una ruta para el problema de una red del agente viajero.

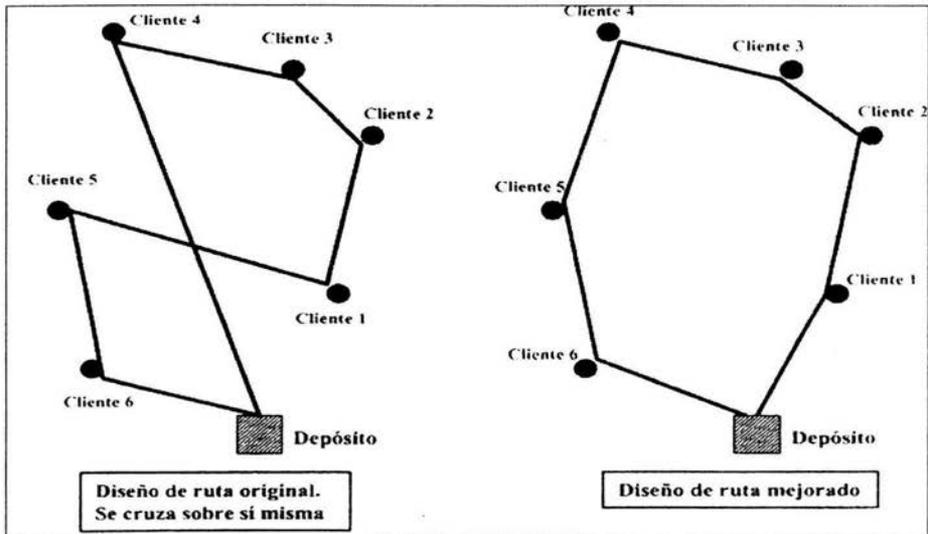


Figura 12²².

De lo anterior remarcamos algo muy importante y siempre debe estar presente al formular este tipo de problemas: un agente viajero debe visitar n ciudades, cada una exactamente una vez. La distancia entre cada par de ciudades ij , denotada por d_{ij} ($i \neq j$), es conocida y puede depender de la dirección en que se viaja (d_{ij} no es necesariamente igual a d_{ji}). El problema es definir un tour que comience y termine en la misma ciudad y minimice la distancia total recorrida.

²² Fuente: Ballou R., *Business Logistics Management, 4th edition*, Prentice-Hall, USA, 1999.

Suponiendo que nombramos la ciudad donde comienza el agente como la ciudad 0 y como ciudad $n + 1$. (Entonces podemos pensar que la ciudad inicial del agente es la ciudad 0 y la ciudad final deseada es $n + 1$).

También se introduce la variable cero-uno x_{ij} ($i = 0, 1, \dots, n, j = 1, \dots, n + 1 \neq j$), donde $x_{ij} = 1$ si el agente viajero viaja de la ciudad i a la j , y $x_{ij} = 0$ en otro caso.

Para garantizar que otra ciudad (excepto la cero) es visitada exactamente una vez tenemos:

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} = 1 \quad (j = 1, \dots, n + 1, i \neq j) .$$

De forma similar, para asegurar de que se parte de cada ciudad (excepto de la ciudad $n + 1$) exactamente una vez se tiene:

$$\sum_{j=1}^{n+1} x_{ij} = 1 \quad (i = 0, 1, \dots, n, i \neq j)$$

Estas restricciones, sin embargo, no eliminan la posibilidad de subtours o *loops* como por ejemplo se muestra en la figura 13:

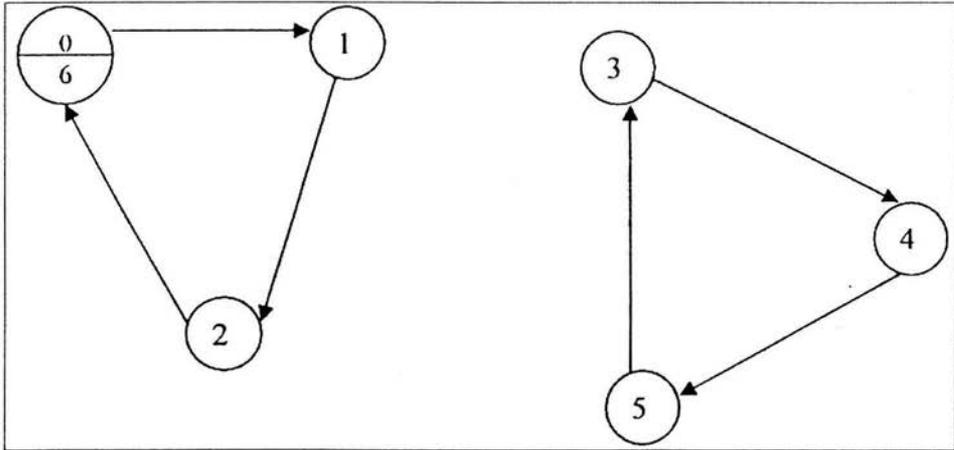


Figura 13.

Donde la solución es $x_{01} = x_{12} = x_{20} = 1, x_{34} = x_{45} = x_{53} = 1$ y $x_{ij} = 0$ en otro caso con $n = 5$.

Una forma de eliminar la posibilidad de subtours es adicionando las restricciones: $\alpha_i - \alpha_j + (n+1)x_{ij} \leq n$ ($i = 0, 1, \dots, n, j = 1, \dots, n+1, i \neq j$), donde α_i es un numero real asociado con la ciudad i .

Para mostrar que una solución que contiene *loops* no puede satisfacer estas restricciones, considerando algún subtour excepto uno que contiene a la ciudad de origen. Entonces si sumamos las desigualdades correspondientes a la $x_{ij} = 1$ alrededor del *loop*, la $\alpha_i - \alpha_j$ cancela a cada otra y sólo nos quedamos con la parte $(n+1)N \leq nN$ donde N es el numero de arcos del subtour y entonces $(n+1)N \leq nN$ es una contradicción.

Por otro lado, para verificar que estas restricciones pueden ser satisfechas cuando no hay subtours, se define $\alpha_0 = 0, \alpha_{n+1} = n+1$ y se debe hacer que $\alpha_j = K$ si la ciudad es la K -ésima ciudad visitada en el tour.

Entonces, cuando $x_{ij} = 1$, tenemos:

$$\alpha_i - \alpha_j + (n+1) = K - (K+1) + (n+1) = n$$

Así también, dado que $1 \leq \alpha_j \leq n+1$ ($i=1, \dots, n+1$) las diferencias $\alpha_i - \alpha_j$ son siempre $\leq n$ ($\forall i, j$) y así, las restricciones quedan satisfechas cuando $x_{ij} = 0$.

Para completar el modelo queriendo minimizar la distancia total

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=1, j \neq i}^{n+1} d_{ij} x_{ij}$$

O una formulación de programación entera²³ del problema del agente viajero es definir las variables x_{ij} y los números reales arbitrarios α_i para los cuales:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=0}^n \sum_{j=1, j \neq i}^{n+1} d_{ij} x_{ij}$$

Sujeto a

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} = 1 \quad (j=1, \dots, n+1, i \neq j)$$

$$\sum_{j=1}^{n+1} x_{ij} = 1 \quad (i=0, \dots, n, i \neq j)$$

$$\alpha_i - \alpha_j + (n+1)x_{ij} \leq n \quad (i=0, \dots, n, j=1, \dots, n+1, i \neq j)$$

²³ Esta formulación fue presentada originalmente por Trucker.

y

$$x_{ij} = 0 \text{ ó } 1 \quad (i = 0, \dots, n, j = 1, \dots, n + 1, i \neq j)$$

donde $x_{0,n+1} = 0$ (ya que $x_{ij} = 0$ para $i = j$).

3.4 El método de barrido

Para comenzar se hace la suposición que existe un almacén central de donde parten los vehículos para realizar las entregas, regresando a este al terminar, el método no tiene dificultad en su aplicación aún en el caso que se tengan que realizar muchas paradas, como su forma de uso es simple facilita la implementación en la computadora, y así la tarea de diseñar rutas se hace con mucha facilidad.

El método de barrido es un procedimiento heurístico²⁴ que proporciona soluciones muy cercanas al verdadero óptimo en tiempos razonablemente cortos. El método también se conoce en la literatura como la heurística de "Rutear primero-Aglomerar después", esto dado que primero se organizan las paradas para luego organizar la secuencia de visitas.

Este método en la práctica no es muy preciso, se han presentado errores de cerca de un 10% del valor óptimo posibles, se ha dado más en casos de minimizar costos, aunque el nivel de este error no es muy pequeño, este método resulta de gran ayuda cuando el transportista requiere de soluciones buenas en tiempos muy breves. Se han presentado casos extremos donde los encargados de despachar viajes necesitan

²⁴ Bramel, J. & Simchi-Levi, *The Logic of Logistics: Theory, Algorithms and Applications for Logistics Management*, Springer Series in Operations Research, New York, 1997.

nuevos patrones de ruteo cuando el viaje ya ha salido del almacén central y se reciben nuevos datos de la carga a entregar, y es donde el método de barrido es de gran utilidad para hacer reconfiguraciones de la ruta a seguir²⁵.

El método de barrido trabaja en dos etapas:

- Primero, a cada vehículo se le asignan sus paradas hasta completar la carga máxima que puede llevar.
- Segundo, se determina el orden en que se visitarán las paradas por el vehículo, tratando de seguir principios de buen ruteo.

Una de las desventajas que presenta este método es que no maneja adecuadamente las restricciones de tiempo, ya sea en cuanto a cumplimiento de ventanas de tiempo o a restricciones en el tiempo total que deben viajar los vehículos (tal vez por la disponibilidad de chóferes), pero una gran ventaja es la posibilidad de generar con rapidez propuestas de ruteo para los vehículos para proporcionar una base con la cual los despachadores pueden hacer los ajustes necesarios.

Los pasos del método de barrido son los siguientes:

Paso 1: Se localizan todos los puntos de entrega (paradas) en un mapa o diagrama con coordenadas cartesianas y se enlistan los vehículos en orden de mérito por su capacidad de carga, eligiendo primero al de mayor capacidad.

²⁵ Ballou R., *Business Logistics Management, 4th edition*, Prentice-Hall, USA, 1999.

Paso 2: A partir del depósito se dibuja una línea recta en cualquier dirección. Esta línea hará las veces de una "aguja giratoria", que irá tocando todas las paradas.

Se gira la línea recta alrededor del depósito hasta tocar una parada. Si la demanda en esta parada no excede la capacidad disponible del vehículo, se incluye en la ruta, continuando con el giro de la recta hasta tocar la siguiente parada. Otra vez, si la demanda en la nueva parada no rebasa la capacidad disponible del vehículo, se incluye en la ruta y se prosigue con el giro de la recta. Continuando así, se completan las paradas para el primer vehículo en el momento en que la parada que se examina tiene una demanda que rebasa la capacidad disponible del vehículo. Esta parada es la que inicia el próximo ciclo para determinar ruta, usando el siguiente vehículo de mayor capacidad.

Paso 3: Una vez determinadas las paradas que cubrirán los vehículos, se procede a determinar el orden en que se visitarán. Para esto se puede seguir el principio de formar patrones de gota en la ruta, o si se tiene tiempo y software, encontrar soluciones del problema del agente viajero para cada grupo de paradas.

La Figura 14 ilustra el método de barrido para una flotilla de vehículos, todos con la misma capacidad de 8,000 kg de carga. En la parte izquierda se tiene el patrón de demanda de siete paradas con demandas variadas acumulando 13,500 kgs; el número sobre cada parada indica la demanda en ese lugar. En la parte derecha de la figura se tiene la solución con el método de barrido, que genera 2 rutas para cubrir el total de paradas.

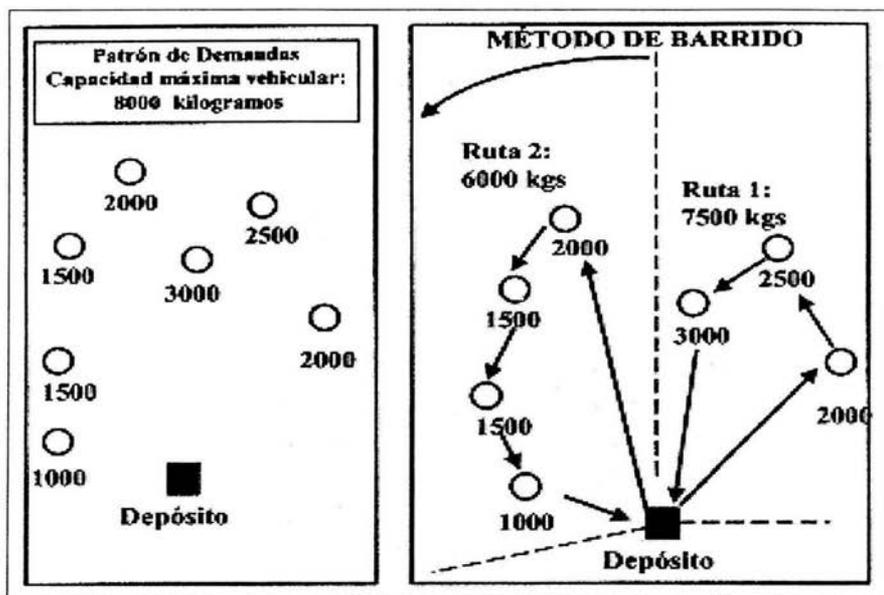


Figura 14²⁶.

3.5 Secuenciación temporal de rutas.

Una vez que se han determinado las rutas para los movimientos de carga por alguno de los métodos anteriores, por lo general se asigna a cada ruta un vehículo para hacer el recorrido. El vehículo recorre su ruta, efectúa las paradas y maniobras necesarias y al terminar su última visita, regresa al depósito de donde partió.

Para las rutas más cortas, puede ocurrir que los vehículos regresen relativamente pronto al depósito y estén ociosos el resto de la jornada. Cuando se presenta esta situación es entonces recomendable organizar nuevamente todas las rutas cortas para que el vehículo que termina de

²⁶ Fuente: Ballou R., *Business Logistics Management*, 4th edition, Prentice-Hall, USA, 1999.

recorrer pronto una ruta corta, tenga la opción de realizar otra ruta y regresar al depósito al terminar.

Al organizar las rutas ordenándolas secuencialmente por la hora de inicio y término de cada una, es posible "encadenar" varias rutas a un solo vehículo, de manera que al terminar una de ellas pueda iniciar la siguiente. De esta manera, se minimiza el tiempo de ocio de los vehículos, se mejora el porcentaje de utilización de la flotilla y se reduce el número total de los vehículos necesarios para recorrer todas las rutas.

A continuación se ilustra la idea.

Ruta	Salida	Regreso
R1	8:00 AM	10:30AM
R2	8:00 AM	12:30 PM
R3	9:30 AM	14:00 PM
R4	11:00 AM	15:30 PM
R5	13:00PM	17:00PM
R6	14:30 PM	16:30 PM
R7	9:00 AM	10:30 PM
R8	11:00AM	14:00 PM
R9	11:00AM	13:00PM
R10	8:00 AM	10:30 AM

Tabla 13.

La tabla 13 muestra un total de 10 rutas que fueron determinadas previamente.

Las horas de inicio y término de estas rutas se calcularon con base en la distancia que deben recorrer, la velocidad media usada en los caminos que cruzan y los tiempos estimados de maniobras en las paradas.

Al organizar la información buscando la secuenciación temporal de inicios y términos de las rutas se obtiene la figura 15.

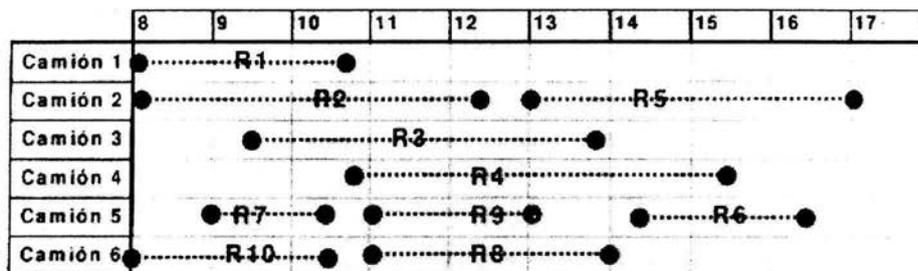


Figura 15²⁷.

En la figura 15 se marca el inicio y término de cada ruta por las líneas punteadas terminadas en puntos negros. Puede apreciarse claramente que es posible "encadenar" varias rutas para ser atendidas por un mismo vehículo. Así, las rutas 2 y 5 pueden manejarse con un solo camión; del mismo modo las rutas 7, 9 y 6 pueden ser asignadas a un mismo vehículo. Los tiempos de maniobras necesarios antes de iniciar una ruta pueden incluirse en el cuadro y hacer los ajustes necesarios para verificar que sea posible el movimiento.

²⁷ Fuente: Ballou R., *Business Logistics Management, 4th edition*, Prentice-Hall, USA, 1999.

4. Software para problemas de ruteo vehicular

Existen varios tipos de paquetes de cómputo referente a las diversas operaciones de transporte, entre ellas el diseño de rutas de vehículos. Los sistemas son muy variados en sofisticación y costo, pero pueden ser satisfactorios dependiendo de las necesidades de la empresa.

Hay desde sistemas que sólo sugieren la ruta óptima entre uno o más puntos; hasta aquellos que optimizan el uso de la flota de vehículos, involucrando todo tipo de restricciones. Independientemente del grado de sofisticación, todos los sistemas usan una base de datos que contiene información detallada sobre la región de distribución, así como sobre las carreteras o calles, y puntos, dentro de la misma región. Esta información es de utilidad para estimar los tiempos y las distancias de recorrido. Obviamente, la base de datos debe ser actualizada constantemente.

Infoguía Roji es una base de datos de este tipo, disponible en México para las principales ciudades de la República, que funciona en una computadora y es actualizada anualmente.

El desarrollo de un sistema de diseño de rutas para una sola empresa resulta muy difícil y costoso, ya que además de requerir de la base de datos, necesita de amplia programación matemática especializada. De aquí la importancia de conocer los paquetes comerciales existentes.

Los sistemas de rutas de vehículos pueden ser usados de tres modos distintos:

1) Estratégico.- Considera las implicaciones de cambios en el número o localización de depósitos, en el tamaño de la flota de vehículos, etc.

2) Táctico: Para la revisión periódica de grupos de rutas para un conjunto de puntos aproximadamente constante.

3) Operacional: Determina la ruta diaria para un conjunto variable de puntos.

La desventaja de los sistemas comerciales es que requieren gran cantidad de datos de entrada: la referencia de la fuente en la retícula, la referencia de cada uno de los puntos, detalles sobre la flota de vehículos (peso, volumen), velocidad permitida en cada clase de vía, tiempos de carga y descarga del vehículo, etc.

La corrida de un sistema produce la determinación de la carga para cada vehículo, considerando restricciones de volumen, peso o tiempo. Generalmente el objetivo es repartir los pedidos disponibles usando el menor número posible de vehículos, o distribuir a tantos puntos como sea posible con los vehículos disponibles. Muchos paquetes manejan también prioridades.

Cuando se introduce un paquete de cómputo para rutas, se recomienda checar cuidadosamente las rutas que éste origine, con el fin de estabilizar el sistema, lo que a su vez mejorará las rutas obtenidas. Según

estudios realizados por Taylor Keith²⁸, el incremento en la productividad del vehículo, alcanzado por mejores rutas, puede llegar a ser más del 20%.

4.1. Guías para el uso práctico de programas de ruteo vehicular

La implementación práctica de software de ruteo vehicular para resolver los problemas del despacho de vehículos y la conformación de las rutas en una empresa transportista es una actividad que debe hacerse combinando la experiencia e intuición del analista del sistema de transporte con los apoyos que brinda el software de ruteo.

Un enfoque muy pragmático entre los operadores logísticos es el de Vista Previa-Solución-Revisión²⁹ que se puede resumir en las tres etapas siguientes:

1. El problema de ruteo que interesa resolver debe someterse a una revisión previa, a fin de examinar todas las excepciones que hay que considerar. Así, por ejemplo, es conveniente identificar los embarques que requieren de un tratamiento especial, las entregas que son de emergencia, o los movimientos de carga que no tienen alternativa para realizarse, como es el caso de movimientos de carro entero directos entre un origen y un destino. De este modo, el análisis con el apoyo del software se hará solamente en el resto de los movimientos de carga.

²⁸ Estudio realizado por Taylor Keith, *Graphical Interpretation of the Transportation Problem*, Transportation Science, Vol.23 No. 1, Febrero, 1999.

²⁹ Ballou R., *Business Logistics Management, 4th edition*, Prentice-Hall, USA, 1999.

2. Identificado ya el problema reducido, se cargan datos en el software de ruteo que se usará como apoyo, se hacen las corridas necesarias y se obtiene una solución que es examinada por el analista del sistema de transporte. Esta solución puede considerarse como una solución matemáticamente calculada que es una guía para la toma de decisiones en el problema real.

3. Finalmente, se hace una revisión detallada de la solución generada por el software de ruteo, introduciendo las modificaciones que puedan ser necesarias para poder llevar a la práctica la solución propuesta. En esta revisión de la solución propuesta se incluyen consideraciones como acuerdos sindicales entre los conductores de los vehículos, condiciones cambiantes luentes por mantenimiento en la red de caminos o las demandas para entrega/colecta que de último momento se desea incluir en el problema.

4.2. Software comercial para ruteo vehicular

Actualmente, existe una enorme variedad de programas de cómputo que se ofrecen para realizar actividades de ruteo vehicular.

Mucho de la oferta existente se encuentra en páginas Web de Internet en donde se anuncian los respectivos fabricantes y se ofrecen como soluciones de todo tipo para las empresas transportistas, desde las etapas de planeación de rutas o localización de almacenes, hasta las etapas operativas de control de consumos de combustible, ciclos de mantenimiento vehicular o control de la plantilla de conductores.

Dos sitios en la WWW (*World-Wide-Web*) que resumen información reciente sobre diversos productos de software para ruteo vehicular son los siguientes:

1) El sitio del INFORMS³⁰, que es el *Institut for Operations Research and Management Science*. Incluye entre sus páginas una sección dedicada a encuestar a fabricantes de programas de cómputo para aplicaciones específicas.

En particular, la última encuesta relacionada a software de ruteo (*Vehicle Routing Survey*), que es de 1997, da un resumen de las características principales de 20 paquetes comerciales para tareas de ruteo vehicular. Los fabricantes incluidos en este resumen son todos norteamericanos y tienen referencias para hacer contacto con ellos si se desea mayor información sobre sus productos.

2) El sitio de la Universidad de Karlsruhe³¹, Alemania, en donde se reportan resúmenes de las características de 37 paquetes de uso actual. En estos resúmenes hay varios fabricantes europeos, además de otros de origen norteamericano. También se incluyen las referencias de los fabricantes si se desea entablar contacto con ellos.

La información que se presenta en estos sitios da una idea de lo que se puede encontrar en el mercado de software. La tabla 14 muestra un resumen con las características principales de 17 de los programas reportados por INFORMS.

³⁰ La dirección de Internet es: http://www.lionhrtpub.com/orms/surveys/Vehicle_Routing/Vehicle_Routing_Survey.html.

³¹ La dirección de Internet es: http://www.wior.uni-karlsruhe.de/Bibliothek/Software_for_OR/Vehicle_Routing/com/aacom.html

Producto	Fabricante	Plataforma			Núm.de paradas	Núm.de vehículo	Núm.de terminales	
		Win95	NT	Unix				
GeoRoute	Kositzky&Assod	Sí	Sí	No	4600	512	256	GeoWhiz
GeoRoLrte5	Giro Enterprises	Sí	Sí	No	ilimitado	ilimitado	ilimitado	Ardnfo, Mapirrho
LoadManager	Roadnet	Sí	Sí	No	s/d	s/d	s/d	s/d
Load Express Plus	Information Software	Sí	Sí	No	ilimitado	500	ilimitado	Interfaz propia, se adapta a
Manugistics Routing&Scheduling	Manugistics, Inc.	Sí	Sí	No	ilimitado	ilimitado	ilimitado	Xeta, Rockwell, Cadec, Autoroach
OVERS	Bender Management	Sí	Sí	Sí	10000	1000	100	MapObjects
RIMMS	Ljghtstone Group	Sí	Sí	No	ilimitado	ilimitado	ilimitado	archivos con el formato de ESRI *
ROADNET500	Roadnet	Sí	Sí	No	ilimitado	ilimitado	ilimitado	mapas tipo GDT
RoadShowfor Windows	ROADSHOW Intemational,	Sí	Sí	No	8000	ilimitado	ilimitado	GDT, Etak, Mapinfo
Routrronics	Carrier Logistics	No	No	Sí	ilimitado	ilimitado	ilimitado	Mapinfo
SHIPCONS 11	Insight, Inc.	Sí	Sí	No	ilimitado	ilimitado	ilimitado	GDT,
Taylor 11	F&H	Sí	Sí	No	100	100	1000	s/d
Territory Planner	Roadnet Technologies	Sí	Sí	No	ilimitado	ilimitado	ilimitado	mapas tipo GDT
TESYS	Inform Software	No	Sí	Sí	3000	1000	500	CDPD/PS/RF
TransCAD	Caliper	Sí	Sí	No	ilimitado	ilimitado	ilimitado	Maptitude, GIST
Trapeze-FX	Trapeze Software Group	Sí	Sí	No	ilimitado	ilimitado	ilimitado	Etak, Mapinfo, ArcInfo TIGER
TruckStops for Windows	Mero Analytics Inc.	Sí	Sí	No	16000	16000	16000	Cualquier producto que maneje datos en formato ASCII

Tabla 14.

Como puede apreciarse en la tabla, existen muchas opciones de software para distintas necesidades que puedan encontrarse en las empresas transportistas interesadas en utilizar estos productos. Llama la atención de la tabla el predominio de Windows como plataforma de desarrollo de este software, tanto en la edición de Windows 95 como en el sistema operativo Windows NT. Las capacidades en cuanto a número de paradas para las rutas que se manejan, así como el número de vehículos y el número de terminales, resultan sumamente atractivas para las tareas de despacho de carga y ruteo vehicular.

Particularmente importante es la última columna de la tabla, marcada como "Interfaz SIG", ya que se refiere al software que permite a los programas que se anuncian en la tabla, manejar datos de mapas digitalizados en un sistema de información geográfica (SIG), y por tanto, dar soluciones lo más realistas posibles a los problemas de ruteo de vehículos.

El software de ruteo que se muestra en las fuentes tanto de INFORMS como de la Universidad de Karlsruhe ofrece en muchos casos el manejo de mapas digitalizados de zonas geográficas en Estados Unidos o Canadá, pero no de México. Por ejemplo, el paquete ArcLogistics Route, anunciado en la página Web de la Universidad de Karlsruhe, cita en su publicidad lo siguiente: "Seleccione su área de servicio en nuestra base de datos de alta calidad de calles en los Estados Unidos y comience a localizar con precisión las ubicaciones de sus clientes y a generar rutas realistas desde el primer día que empiece a usar ArcLogistics Route". Esta característica del paquete resulta sumamente atractiva para los operadores logísticos que se encuentran en los Estados Unidos, pero es claro que no tiene una aplicación inmediata para empresas transportistas que manejan sus flotillas vehiculares en México.

A la fecha de esta investigación (finales de 1999) la única empresa en México que ofrecía posibilidades de tener en un corto plazo mapas digitalizados del país, incluyendo caminos y carreteras principales, era Sistemas de Información Geográfica, S. A. (SIGSA) ubicada en la Ciudad de México. En la página Web de SIGSA: <http://www.geocentro.com.mx/>, se anuncia el "Proyecto México", en el cual se pretende elaborar mapas digitalizados de nuestro país en escalas de 1:200,000, 1:40,000, 1:10,000 y de 1:5,000.

La necesidad de contar con mapas digitalizados de México, en los cuales se puedan acceder elementos geográficos como caminos, carreteras, vías férreas y obstáculos importantes para el diseño de rutas resulta evidente para poder explotar ampliamente todas las capacidades del software comercial existente para tareas de ruteo vehicular, o en todo caso, para aprovechar mejor los desarrollos de software propios que las empresas transportistas puedan realizar usando métodos como los citados en el capítulo 2 de este trabajo.

4.3. Software didáctico para solución de problemas de ruteo vehicular

En la práctica, los problemas de transporte no se resuelven manualmente, sino con ayuda de algún paquete de cómputo o programa especializado, como son los casos de QSB³², Lindo³³ y Lingo³⁴ referidos a la solución de los problemas de ruta más corta. Una opción distinta y relativamente reciente es el uso de hojas de Excel con complementos que facilitan los cálculos.

³² Ver manual de QSB por Facultad de Ingeniería DEPMI/ UNAM

³³ Ver manual de Lindo por Facultad de Ingeniería DEPMI/ UNAM

³⁴ Ver manual de Lingo por Facultad de Ingeniería DEPMI/ UNAM

A partir de la versión 5.0 de Excel, Microsoft empezó a manejar un lenguaje de macros (listas de instrucciones a seguir automáticamente) para esta hoja electrónica de cálculo que se conoció como Visual Basic Applications (VBA). El lenguaje VBA ha resultado ser lo suficientemente poderoso y flexible como para permitir la programación de casi cualquier técnica de investigación de operaciones. Varias de estas técnicas se han desarrollado como complementos (Add-ins, en la literatura inglesa) para Excel, los cuales al ser instalados en el manejador de la hoja de cálculo, incrementan la funcionalidad de Excel al permitir la construcción y el formateo automático de las hojas, efectuando los procedimientos computacionales necesarios e interactuando con el usuario para la captura y edición de los datos³⁵.

Entre las técnicas disponibles como complementos de Excel está un módulo de Programación Matemática que resuelve modelos de optimización, dentro de los cuales se encuentra el modelo de transporte.

³⁵ Paúl A. Jensen de la Universidad de Texas en Austin publicó desde Junio/99 una página Web donde explica el uso de estos "Add-ins" para Excel, y permite descargar archivos de muestra (downloads); la referencia en internet es: <http://moh3can.me.u.texas.edu/~jensen/addins>.

5. Aplicación práctica

En el manejo de vehículos de transporte de mercancías, en redes viales, es de mucha ayuda el uso de un método de optimización, el que se adapta a los requerimientos de este tipo de problemas es el algoritmo de la ruta más corta, ya que se debe tener organizados los movimientos de dichos vehículos.

El movimiento de vehículos con carga de productos no perecederos es muy común en México, como una muestra del empleo de este tipo de método se presenta un caso de una empresa especializada en estos servicios, la empresa es **Transportes Julián de Obregón, S. A. de C. V.**, esta empresa está especializada en el transporte de productos no perecederos y presta servicios a todo lo largo y ancho de la república mexicana enlazado con 7 rutas a las 40 plazas más importantes del país. Además se ofrecen servicios especiales más allá de nuestras fronteras hacia Centro y Sudamérica, así como a los Estados Unidos vía Tijuana.

La figura 16 muestra las localizaciones de los centros operativos de Transportes Julián de Obregón en la república mexicana.



Figura 16.

La infraestructura con la que cuenta Transportes Julián de Obregón se presenta en la tabla 15.

El problema que enfrenta Transportes Julián de Obregón día con día es el diseñar la ruta de recorrido del vehículo, al ser una empresa muy antigua, se basa en la experiencia de los operadores para darle solución y determinar el recorrido del vehículo, esto quiere decir que nunca se toman en cuenta rutas alternativas y todo se resuelve de manera convencional.

Retomando un caso que a Transportes Julián de Obregón se le presento y que ellos resolvieron como tradicionalmente dan solución a este tipo de problemas, la situación fue, transportar mercancía para una tienda de artículos de oficina, de la ciudad de México hacia Nuevo Laredo.

Unidades
<ul style="list-style-type: none"> • Tipo trailer: 300 unidades. • Tipo tortón: 200 unidades. Con capacidad de 15 toneladas y 24-26 pies • Tipo rabón: 35 unidades. Con cajas de 22 pies y capacidades de 9-10 toneladas. • 60 Camionetas 3 1/2 toneladas.
Personal que opera en dicha empresa
<ul style="list-style-type: none"> • 595 operadores. • 150 personal operativo. • 350 personas de estiba y reparto urbano.

Tabla 15.

Transportes Julián de Obregón reporta que la ruta a seguir debido a su experiencia adquirida es salir por Pachuca pasando por Tampico, Cd. Mante, Cd. Victoria, Monterrey hasta llegar a Nuevo Laredo, teniendo un tiempo total de recorrido de 18 horas, conduciendo sin paradas.

En la figura 17 se muestra un esquema simplificado de las carreteras que salen de la ciudad de México hacia Nuevo Laredo, así como la distancia entre ciudades.

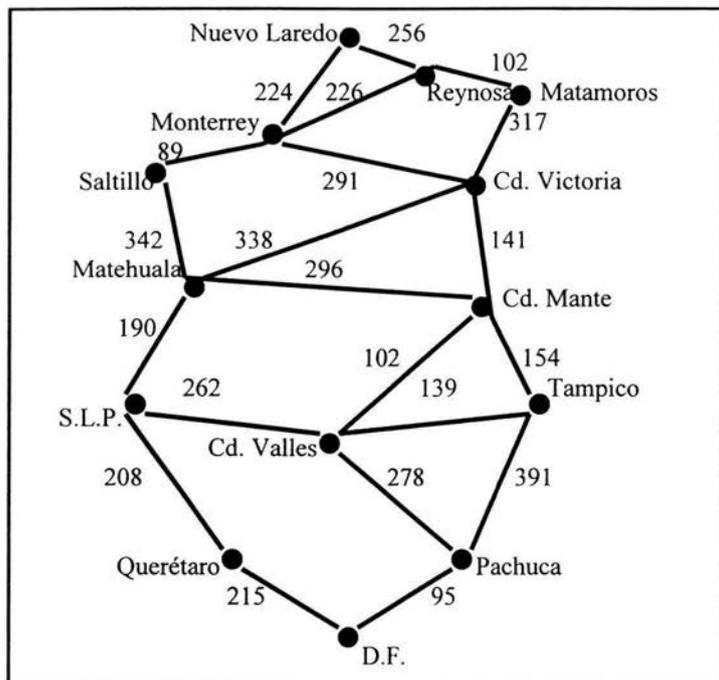


Figura 17³⁶.

Los valores en los arcos representan los kilometrajes estimados para los tramos, tomados de una guía de carreteras nacionales (infoguía roji).

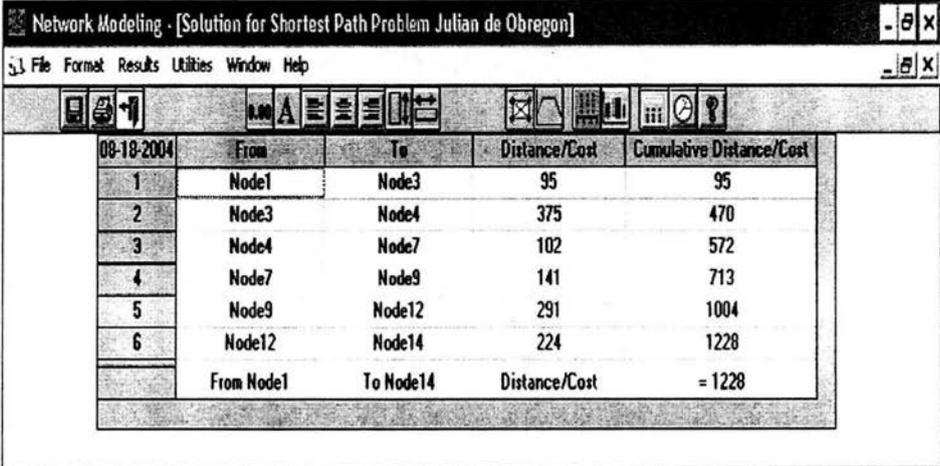
La metodología para encontrar la ruta óptima para el movimiento de los vehículos, en situaciones típicas, es la ruta más corta ya que es la más atractiva a seguir, dada la natural búsqueda de reducir al máximo los gastos operativos.

Para la ruta más corta, el sistema utiliza una versión del conocido algoritmo de Dijkstra, que inicia en el nodo origen y va avanzando en la

³⁶ Elaboración propia con datos de infoguía roji, *Por las carreteras de México*, México 2004.

construcción de la ruta, etiquetando nodos intermedios hasta llegar al destino.

Resolviendo el problema con el apoyo de un programa típico en investigación de operaciones, el QSB (Quantitative Systems Business), se obtiene un listado con la solución de la ruta más corta.



08-18-2004	From	To	Distance/Cost	Cumulative Distance/Cost
1	Node1	Node3	95	95
2	Node3	Node4	375	470
3	Node4	Node7	102	572
4	Node7	Node9	141	713
5	Node9	Node12	291	1004
6	Node12	Node14	224	1228
	From Node1	To Node14	Distance/Cost	= 1228

Figura 18.

El resultado nos indica que la ruta óptima que debería recorrer el transporte de Julián de Obregón es: DF-Pachuca-CD Valles-CD Mante-CD Victoria-Monterrey-Nuevo Laredo.

La figura 19 muestra la solución grafica. El valor en cada nodo es la distancia más corta posible para llegar a ese nodo. Sin embargo, es posible utilizar otros valores que pueden ser de interés para un análisis de ruta. Si los valores en los arcos de la red representan un tiempo promedio que se tardan en recorrerlos, o alguna medida del costo que implica recorrerlos, el algoritmo de la ruta más corta puede aplicarse. Un esquema de la red

analizada anteriormente, pero considerando tiempos de recorrido en los arcos, se muestra en la figura 20.

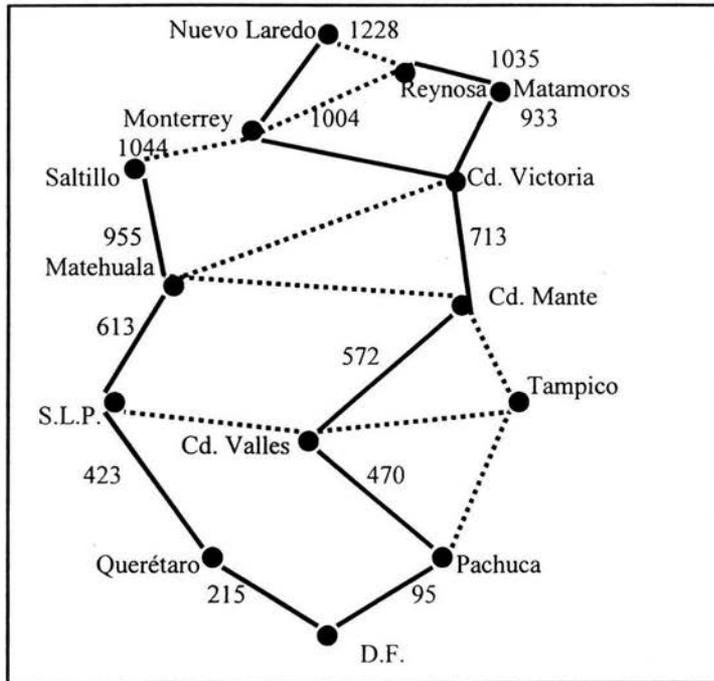


Figura 19.

Los números en los arcos son tiempos estimados de recorrido en horas y minutos para cada tramo. Estos tiempos se estimaron considerando que los vehículos se mantienen en distintas velocidades medias de operación, dependiendo del tipo de terreno que cruzan.

Así para terreno montañoso se supone una velocidad de 50 km/h en tramos con bastantes curvas o terrenos montañosos, de 60 a 75 km/h en tramos mixtos (curvas-rectas), de 80 a 90 km/h en tramos rectos o planos, y un máximo de 100 km/h en tramos rectos de autopista.

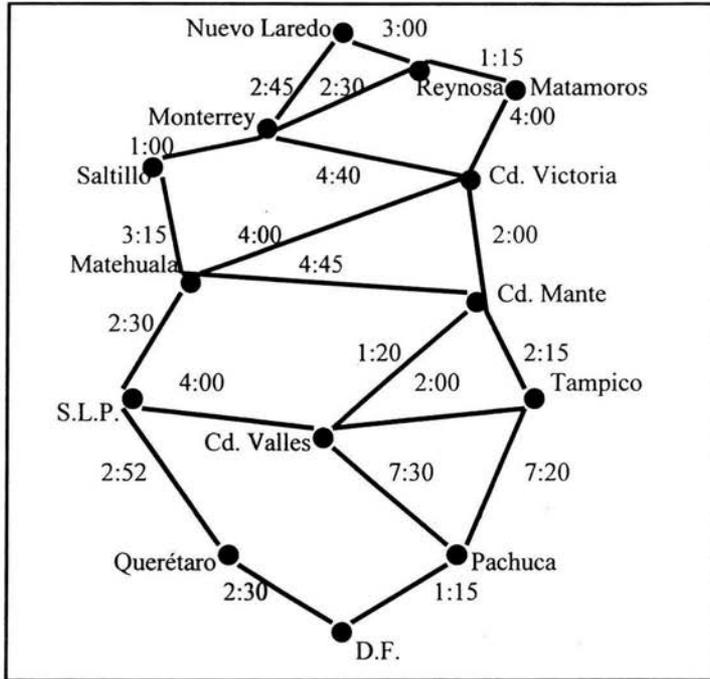


Figura 20.

Resolviendo el problema con el apoyo del QSB, se obtiene un listado con la solución de la ruta más corta basado en los tiempos de recorrido.

Para realizar el llenado de datos en la tabla del programa de QSB se consideran los tiempos en minutos.

Network Modeling				
File Format Results Utilities Window Help				
0.00 [Icons]				
Solution for Shortest Path Problem juliantiempos				
08-19-2004	From	To	Distance/Cost	Cumulative Distance/Cost
1	Node1	Node2	160	160
2	Node2	Node5	172	332
3	Node5	Node8	150	482
4	Node8	Node10	195	677
5	Node10	Node12	70	747
6	Node12	Node14	165	912
	From Node1	To Node14	Distance/Cost	= 912

Figura 21.

Con estas consideraciones se ajusta el modelado para una representación más realista de los movimientos de vehículos de carga. Aplicando el algoritmo de la ruta más corta al esquema de la figura 20, se obtienen rutas más rápidas que se observan en la figura 22.

Los números en los nodos indican el tiempo más corto posible para llegar a esos nodos.

Como podrá apreciarse en las dos soluciones dadas, el algoritmo en si no distingue si los datos dados representan distancia, tiempo, costo o alguna otra medida de eficiencia que se desea optimizar.

Por lo tanto, la segunda consideración en la aplicación del algoritmo de la ruta más corta es la que se adapta de mejor manera para el transporte de carga y se obtiene que la ruta óptima a seguir es: salir por Querétaro pasando por S.L.P, Matehuala, Saltillo, Monterrey hasta llegar a Nuevo Laredo.

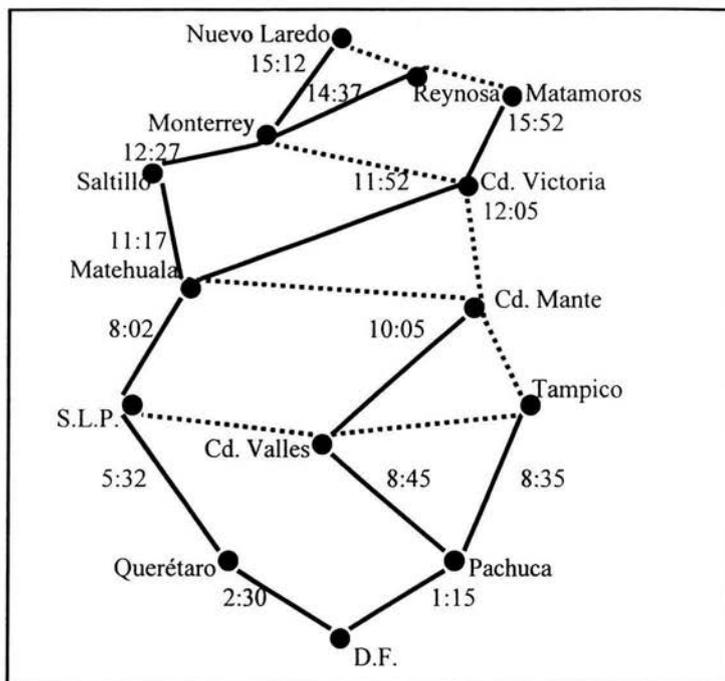


Figura 22.

La ruta que Transportes Julián de Obregón sigue para llegar al destino Nuevo Laredo en teoría es la más corta, pero al tomar en cuenta los tiempos de recorrido tenemos como resultado que la ruta óptima es la que se presenta en la segunda aplicación, por lo tanto, un primer paso para una exitosa aplicación del algoritmo de la ruta más corta es contar con una buena representación de la red de carreteras en la que se pretende utilizar; mientras más precisa sea la representación de la red de carreteras, más realista será la solución aportada por el algoritmo.

Conclusiones

El transporte de carga aparece en casi todo el proceso productivo, desde el abasto de insumos a las industrias, siguiendo luego por el flujo de productos hacia almacenes para finalmente llevar los productos terminados a los consumidores finales. Esta descripción global del proceso productivo, en el cual el transporte es un elemento fundamental de apoyo al mismo, se desarrolla por completo con el uso del enfoque logístico. Bajo este enfoque, todas las etapas del proceso productivo, desde la obtención de los insumos y materias primas hasta la llegada de productos terminados al consumidor final, son descritas junto con los elementos fundamentales que las acompañan.

De este modo, surgen del enfoque logístico algunas cuestiones básicas que deben responderse para tener un flujo eficiente dentro de la cadena, tales como: ¿cuáles son las rutas para utilizar los vehículos?, ¿cuánto embarcar a cada ruta?, o ¿cuándo hacer los embarques?, centran la atención directamente sobre la problemática que cotidianamente tienen que enfrentar los despachadores de vehículos de carga.

Algunas sugerencias derivadas de la práctica se han conocido del ambiente logístico norteamericano y de algunas empresas mexicanas de transporte; sin embargo, en muchas situaciones el enfoque pragmático ya no es suficiente. En consecuencia, el uso de métodos cuantitativos representa una alternativa de gran utilidad para la toma de decisiones mejor sustentada y con mayores alcances. Siguiendo un esquema básico de ingeniería del transporte, la problemática del ruteo vehicular se puede organizar en dos partes: uso eficiente del camino y el uso eficiente de vehículos. Las mejoras a la eficiencia que cada una de estas partes aporta,

se suman en el objetivo común de mejorar el manejo del transporte dentro de la cadena logística.

Para el uso eficiente del camino, existen algoritmos conocidos y bastante probados como son: a) el modelo de la ruta más corta, b) el método del transporte y c) el modelo del agente viajero.

El modelo de la ruta más corta resuelve de modo muy eficiente el diseño de la mejor ruta en costo, distancia o tiempo entre un solo origen y un solo destino. El método del transporte resuelve también con gran eficiencia el diseño del mejor programa de rutas para mover carga desde varios orígenes hacia varios destinos. Estos dos primeros algoritmos son sencillos de programar y dan resultados, matemáticamente óptimos, rápidamente.

El modelo del agente viajero busca la ruta con la menor longitud posible, que saliendo de un origen, visita varios puntos y al final regresa al mismo origen; un ejemplo típico es el reparto de carga que se hace partiendo de un depósito, regresando al mismo al terminar las entregas. Este modelo es computacionalmente más difícil. Aún hoy día sigue la investigación en la búsqueda de un algoritmo general que proporcione óptimo matemático a este problema en tiempos de cómputo que resulten prácticos. Sin embargo, existen modos de resolver el problema que dan soluciones adecuadas para problemas no muy grandes, es decir, con relativamente pocos puntos a visitar. Paquetes de cómputo que se encuentran comúnmente en ambientes universitarios, como es el QSB (Quantitative Systems for Business), incluyen un módulo para resolver el modelo del agente viajero y trabajan razonablemente para problemas con cerca de 100 puntos. Por otra parte, existen sugerencias prácticas para

diseñar rutas para el problema del agente viajero directamente sobre el mapa de carreteras, usando algunos principios de construcción de rutas basados en las formas geométricas que suelen adoptar las soluciones a este problema.

Para el uso eficiente de vehículos existen, por un lado, estrategias logísticas y por otro, algoritmos de ruteo.

Las estrategias logísticas son sugerencias para aprovechar mejor las características de los embarques, ya sea por consolidación de cargas o por uso de rutas fijas en algunos casos y rutas dinámicas en otros, todo con el fin de mejorar la eficiencia de los flujos.

Los algoritmos de ruteo, son métodos para generar rutas para los vehículos que moverán las cargas. Las restricciones usualmente manejadas en estos problemas, como son la distancia máxima permitida a las rutas, el tiempo máximo tolerado para los conductores, la capacidad máxima que puede cargar cada vehículo o los horarios en que se deben hacer ciertas colectas o entregas (conocidos como ventanas de tiempo), complican a tal punto su manejo computacional, que no se ha producido hasta hoy un algoritmo único y general que resuelva cualquier instancia de este tipo de problema en tiempos de orden práctico. Sin embargo, los procedimientos heurísticos, que son métodos que producen soluciones cercanas al óptimo matemático en tiempos breves, han permitido generar métodos para abordar el ruteo vehicular.

Un algoritmo de ruteo de sencillo manejo y que aporta buenas soluciones es el método de barrido. Este método tiene una lógica de

cómputo que resulta sencilla de programar y permite manejar con facilidad la inclusión de las restricciones para el diseño de las rutas.

En cuanto al software comercial disponible, existe una gran diversidad para las tareas de ruteo vehicular.

La gran mayoría de los paquetes comerciales ofrecen una gran variedad de rutinas que resuelven muchas de las tareas que necesitan decidir los operadores, como pueden ser el diseño de rutas con recorridos muy cercanos al mínimo matemático posible, el registro y seguimiento de tiempos de conducción de chóferes, los ciclos de mantenimiento de vehículos, los controles de rendimiento de combustible, el manejo de ventanas de tiempo, etc.

Sin embargo, en la gran mayoría de los casos, los paquetes más desarrollados requieren del uso de mapas digitalizados o de bases de datos del tipo de sistemas geográficos para funcionar adecuadamente y ofrecer soluciones realistas a sus usuarios. Este punto en particular, limitaba en México el uso inmediato de este tipo de software, al menos al concluir la década de los 90.

A finales de 1999, la única empresa mexicana que aparentemente estaba por ofrecer una solución para esta necesidad era SIGSA y de acuerdo a la información de esta empresa publicada en 1999, se tenía en marcha el "Proyecto México", el cual en la actualidad ya proporciona cartografía digital de México en varias escalas.

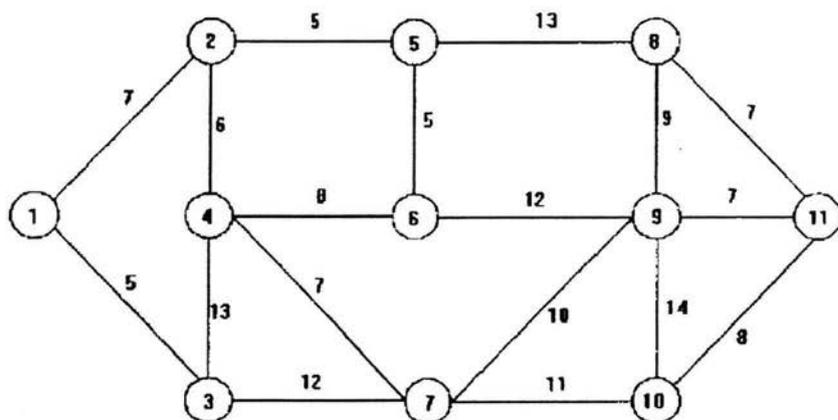
Esta información sería de gran utilidad para el uso del software comercial disponible para ruteo y también para otras tareas de interés para los sistemas geográficos de información.

Finalmente, se puede decir que los operadores logísticos del transporte, particularmente los que enfrentan cotidianamente el diseño de las rutas y la administración de las flotas vehiculares, pueden encontrar en la temática tratada en este trabajo varias alternativas para dar los primeros pasos en la aplicación de técnicas cuantitativas que les brindarán apoyos más sustentados a la toma de decisiones, y en algunos casos, las soluciones óptimas a los problemas planteados.

Anexo³⁷.

Ejemplos de aplicación de técnicas de optimización, resueltos con apoyo del software QSB.

1) Haciendo la suposición de que se tiene una red carretera encuentre la ruta mas corta tomando en cuenta que para llegar de la ciudad 1 a la ciudad 11.



Para inicial con la solución se llena la tabla del QSB con los datos dados:

³⁷ Ejemplos tomados del Manual de QSB+, *Herramienta para Investigación de Operaciones*. DEPM/UNAM, México, 1996.

Network Modeling - [Shortest Path Problem distancias entre ciudades]

File Edit Format Solve and Analyze Results Utilities Window WinQSB Help

Node1 : Node1

From \ To	Node1	Node2	Node3	Node4	Node5	Node6	Node7	Node8
Node1			7	5				
Node2	7				6	5		
Node3	5				13		12	
Node4		6	13			8	7	
Node5		5				5		13
Node6				8	5			
Node7			12	7				
Node8						13		
Node9							10	9
Node10							11	
Node11								7

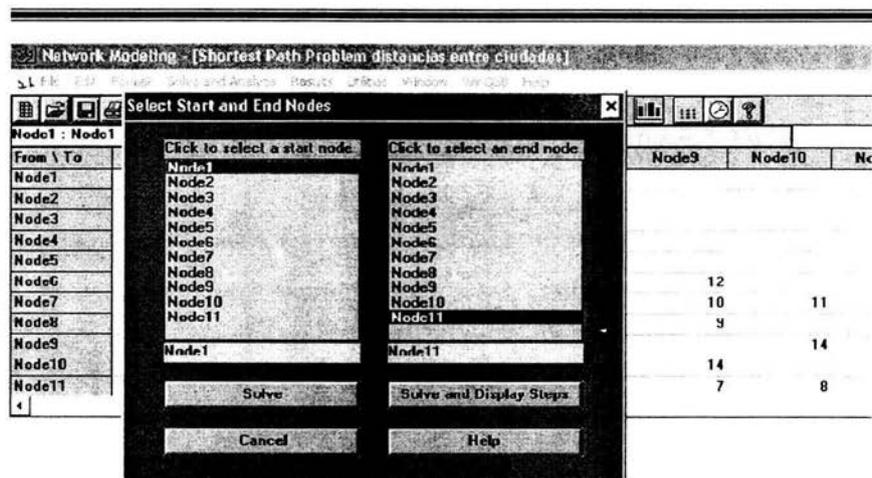
Network Modeling - [Shortest Path Problem distancias entre ciudades]

File Edit Format Solve and Analyze Results Utilities Window WinQSB Help

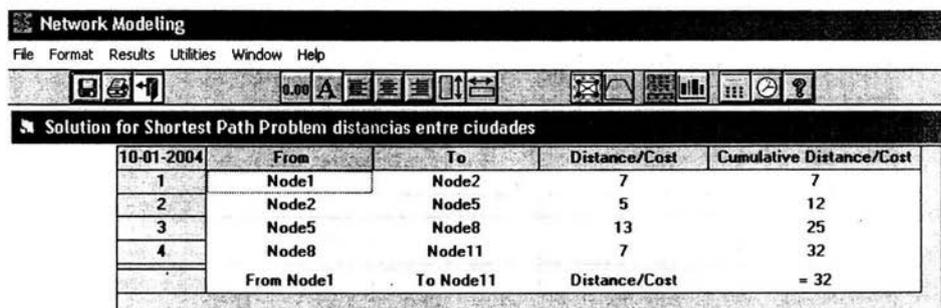
Node1 : Node1

From \ To	Node4	Node5	Node6	Node7	Node8	Node9	Node10	Node11
Node1								
Node2	6	5						
Node3	13							
Node4				8	7			
Node5				5		13		
Node6	8	5					12	
Node7	7						10	11
Node8		13					9	
Node9			12	10	9			14
Node10				11		14		
Node11						7	7	8

Se elige en el menú el nodo de inicio y el nodo final:



El programa resuelve el problema y muestra una tabla de resultados mostrando la distancia de nodo a nodo y la distancia total recorrida. El resultado muestra que el recorrido a seguir es: 1-2-5-8-11, con una distancia total recorrida de 32.



2) Una compañía pondrá en operación cuatro plantas de manufactura dentro de poco tiempo. Estas plantas distribuirán un producto a tres almacenes. Actualmente la capacidad de las plantas y las demandas en los almacenes permanecen estables. Se cuenta con una lista de costos unitarios por transporte, los cuales se muestran en la siguiente tabla. Encuentra, el plan de distribución óptimo para la compañía.

PLANTA	ALMACEN			CAPACIDAD MENSUAL
	A	B	C	
1	20	19	21	12200
2	19	22	18	2800
3	20	20	20	2500
4	21	20	19	2200
DEMANDA MENSUAL	7300	3500	5600	

Se llena la tabla del programa con los datos dados:

Network Modeling

File Edit Format Solve and Analyze Results Utilities Window WinQ5B Help

distribucion: Minimization (Transportation Problem)

Demand : Destination 3 5600

From \ To	Destination 1	Destination 2	Destination 3	Supply
Source 1	20	19	21	12200
Source 2	19	22	18	2800
Source 3	20	20	20	2500
Source 4	21	20	19	2200
Demand	7300	3500	5600	

Al resolver el problema el QSB muestra una tabla como la siguiente y así podemos interpretar los resultados:

Network Modeling
 File Format Results Utilities Window Help

0.00

Solution for distribution: Minimization (Transportation Problem)

10-01-2004	From	To	Shipment	Unit Cost	Total Cost	Reduced Cost
1	Source 1	Destination 1	5400	20	108000	0
2	Source 1	Destination 2	3500	19	66500	0
3	Source 1	Unused_Supply	3300	0	0	0
4	Source 2	Destination 3	2800	18	50400	0
5	Source 3	Destination 1	1900	20	38000	0
6	Source 3	Destination 3	600	20	12000	0
7	Source 4	Destination 3	2200	19	41800	0
	Total	Objective Function	Value =		316700	

Se tiene que el costo total será de: 3,167,00

3) Resolver el problema del agente viajero siguiente para minimizar la distancia total recorrida.

De la Ciudad	A la Ciudad					
	1	2	3	4	5	6
1	-	35	18	60	15	35
2	35	-	28	50	39	26
3	18	28	-	25	45	54
4	60	50	25	-	12	31
5	15	39	45	12	-	29
6	35	26	54	31	29	-

Se llena la tabla con los datos dados:

Network Modeling

File Edit Format Solve and Analyze Results Utilities Window WinQSB Help

recorrido: Minimization (Traveling Salesman Problem)

Node6 : Node6

From \ To	Node1	Node2	Node3	Node4	Node5	Node6
Node1		35	18	60	15	35
Node2	35		28	50	39	26
Node3	18	28		25	45	54
Node4	60	50	25		12	31
Node5	15	39	45	12		29
Node6	35	26	54	31	29	

Se selecciona el tipo de solución que queremos que nos proporcione el programa:

Network Modeling

File Edit Format Solve and Analyze Results Utilities Window WinQSB Help

recorrido: Mini

Node1 : Node2

Traveling Salesman Solution Method

Nearest Neighbor Heuristic
 Cheapest Insertion Heuristic
 Two-way Exchange Improvement Heuristic
 Branch and Bound Method

Node4	Node5	Node6
60	15	35
50	39	26
25	45	54
12	12	31
31	29	

El programa muestra enseguida la solución final:

Network Modeling							
File Format Results Utilities Window Help							
Solution for recorrido: Minimization (Traveling Salesman Problem)							
10-01-2004	From Node	Connect To	Distance/Cost		From Node	Connect To	Distance/Cost
1	Node1	Node5	15	4	Node6	Node2	26
2	Node5	Node4	12	5	Node2	Node3	28
3	Node4	Node6	31	6	Node3	Node1	18
	Total	Minimal	Traveling	Distance	or Cost	=	130
	(Result	from	Branch	and	Bound	Method)	

El programa muestra que el camino a seguir es: 1-5-4-6-2-3-1, con una distancia recorrida de 130.

Bibliografía.

1. Antún Juan Pablo, Cadenas logísticas de transporte. Informe de actividades relevantes del sector comunicaciones y transportes de la economía, 6º num., 2001
2. Arbones M. Eduardo A., Logística Empresarial, Marcombo Boixareu Editores, España, 1990.
3. Ballou, Ronald H., Selected computer programs for logistical planning, version. 4.0., Ed Prentice-Hall, USA, 1999.
4. Bramel J. & Simchi-Levi D., The Logic of Logistics: Theory, Algorithms and Applications for Logistics Management, Springer Series in Operations Research, New York, 1997.
5. Hall Randolph W, Route choice on freight network with concave cost and exclusive arcs, Transportation research vol 23b, 1989.
6. Infogua roji, Por las Carreteras de México, México, 2004.
7. Jensen Paul A., Spreadsheet Add-ins for OR Instruction, OR/MS Online Edition. Operations Research & Management Science, Junio, 1999. Documento de internet: <http://www.lionhrtpub.com/orm/orm-6-99/education.html>

-
-
8. Lozano Cuevas Angélica, Tesis de Maestría: diseño de rutas de distribución y recolección en regiones de diferentes formas bajo restricciones de capacidad de los vehículos., DEPMI/UNAM, 1993.
 9. Manual de QSB+, Herramienta para Investigación de Operaciones, DEPMI/UNAM, México, 1996.
 10. R. C. Vaughn, Introducción a la ingeniería industrial, Ed Reverte, 1993.
 11. Ratliff H. D. y Nutly W. G., Logistics Composite Modeling, The Logistics Institute at Georgia Tech, Atlanta Georgia, 1996.
Documento de internet:
<http://tli.isye.gatech.edu/downloads/lcmwppr.pdf>.
 12. Render, B. & Stair R., Quantitative Analysis for Management, Prentice Hall, 1997.
 13. Roger G. Schroeder, Administración de operaciones, Ed Mac Graw Hill, 1997.
 14. Sheffi Yosef, Some analytical problems in logistics research, *Transportation research* vol 19, 2001.
 15. Taylor Keith, Graphical Interpretation of the Transportation Problem, *Transportation Science*, Vol.23 No.1, Febrero, 1999.
 16. The transport and planning software guide, Londres, Septiembre, 1999.

17. Trujillo Juan José, Elementos de ingeniería industrial, Ed Limusa, 1990.

18. Transportes Julián de Obregón, Principales Transportaciones Realizadas, Documento de Internet:
<http://www.juliandeobregon.com.mx>.