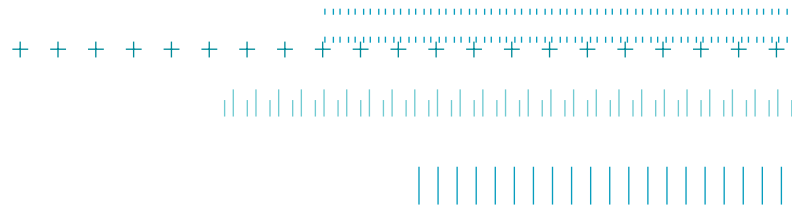


tecnologías ITI

software



optimización logística



OPTIMIZACIÓN LOGÍSTICA CON



www.routingmaps.es

Rubén Ruiz García, Kostanca Katragjini, Carlos Fernández Martínez, Javier Contell García-Uceda, Cătălin Ionuț Plăcintă, Alejandro Rodríguez Villalobos

Grupo de Investigación de Sistemas de Optimización Aplicada del Instituto Tecnológico de Informática

La logística y los problemas de rutas de vehículos o de distribución de mercancías tienen una importancia capital en las economías desarrolladas. El sector del transporte supone el 6% del Producto Interior Bruto (PIB) español. Con una red de 370.000 Km. de carreteras, el sector del transporte en España tiene un gran peso específico y un gran poder de arrastre sobre la práctica totalidad de actividades económicas. Paradójicamente, ajeno a esta relevancia, y según el informe de Fomento y Consultrans (2001), el sector del transporte está formado, en su mayoría, por pequeñas empresas con un retraso considerable en lo que se refiere a la aplicación de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC). Esta situación no es muy diferente en otros países y se debe a la enorme complejidad y variedad de los problemas de distribución, que hace que su tratamiento informatizado sea, a día de hoy, un gran reto. Adicionalmente, los problemas de distribución de mercancías esconden, en la mayor parte de las ocasiones, grandes oportunidades de optimización. Todos estos antecedentes generan una oportunidad en forma de software avanzado de optimización en el ámbito del transporte por carretera.

Este trabajo da a conocer uno de los primeros sistemas de este tipo: un software avanzado de optimización, desarrollado por el ITI en colaboración con profesores de la Universidad Politécnica de Valencia. El sistema se llama RoutingMaps e incorpora los más modernos sistemas de información geográfica o GIS (*Geographical Information Systems*), algoritmos de optimización de última generación y una estructura modular de alta tecnología que lo hace fácilmente adaptable a la gran variedad de problemas de rutas que se dan en el mercado. Con este sistema las empresas pueden optimizar la distribución de mercancías, reduciendo costes, aumentando el servicio y mejorando sus cuentas de resultados de manera clara y efectiva.

1. Los problemas de rutas de vehículos en las empresas

Los problemas de vehículos, sean de distribución o aprovisionamiento de mercancías entre almacenes y clientes, o de cualquier otro tipo, son de gran importancia para la mejora de la competitividad de las empresas. Un sistema logístico ágil y flexible permite a las empresas aumentar su nivel de servicio, reducir costes y competir en un entorno tan complicado como el actual. Sin embargo, aunque las empresas son conscientes de esta necesidad y de sus beneficios, todavía existe una brecha importante entre las necesidades y los recursos o soluciones disponibles. A pesar de su gran experiencia laboral, las empresas de transporte en general tienen una estructura organizativa pequeña, con recursos humanos de desigual formación técnica, y carentes de soluciones tecnológicas avanzadas.

Además, los problemas de rutas de vehículos son altamente complejos de resolver por varios motivos. Primero tenemos que la variedad de problemas de rutas es proporcional a la diversidad de productos y servicios, sistemas de transporte y modos de organización empresarial. No es lo mismo transportar productos perecederos que animales vivos o transporte especial, como puede ser el llevar las palas de un aerogenerador a una zona remota donde va a ser instalado, por poner solo algunos ejemplos. Segundo, los problemas de optimización que subyacen son de unas dimensiones astronómicas, capaces de poner en jaque a los sistemas y software más avanzados aún a día de hoy. Por último, tenemos la dimensión dinámica de estos problemas, donde los recursos varían de un momento a otro, nuevos pedidos, tráfico, condiciones climatológicas, etc.

El transporte por carretera ha ido creciendo en las últimas décadas, superando, de largo, a su competidor histórico para el transporte de mercancías, el ferrocarril, y anteponiéndose, con una enorme ventaja por volumen, al transporte por mar y aire. Concretamente, según de Frías (2006) y Fomento (2010), entre otros, el transporte interior de mercancías por carretera supuso el 83% de las toneladas-kilómetro transportadas en 2008. En términos de costes, y según el estudio de Fomento y Consultora Spim (2008) y Fomento (2010), el combustible y el personal suponen más del 50% de los costes del transporte. Precisamente, en fechas recientes, el gasoil, combustible usado de forma mayoritaria en este sector, ha superado en coste a la gasolina, y ha sido y será fuente de conflictos y huelgas.

De esto se deduce que una optimización de los problemas de distribución y rutas puede tener un alto impacto en la cuenta de resultados de cualquier empresa. La comunidad científica viene estudiando los problemas de rutas de vehículos desde los años 50 y ha reconocido ahorros considerables. En Toth y Vigo (2002) se estiman mejoras de hasta el 20% en problemas típicos de distribución de mercancías. Estos ahorros se disparan si la empresa en cuestión tiene como actividad principal el propio transporte. En cualquier caso, los problemas de transporte vienen definidos por varios factores, como la cantidad, capacidad, características y variedades de los vehículos, productos, restricciones, almacenes, sitios de paso, condicionantes y un larguísimo etcétera.

En el mercado no existe software de propósito general que permita optimizar los recursos (camiones, rutas, tiempo) ante una especificación cualquiera de problema de rutas. Los sistemas integrados ERP como SAP u otros no suelen incorporar módulos de optimización de rutas y no van mucho más allá de controlar todo el flujo de información que se produce, desde el pedido por parte del cliente, hasta el albarán de entrega. No se critican aquí estos sistemas, ya que el disponer de sistemas ERP es ya una gran ventaja y avance. Lo que se pretende señalar en este artículo es la posibilidad de ir mucho más allá, hasta el punto de optimizar toda la problemática logística.

2. El reto de la optimización en problemas de logística

Los problemas de rutas de vehículos se conocen en la literatura anglosajona como *Vehicle Routing Problems* o VRP (Laporte, 2007). En términos generales, un problema de rutas de vehículos consiste en determinar las rutas de un conjunto o flota de vehículos que deben iniciar y finalizar un recorrido desde/hasta uno o varios almacenes o depósitos para atender la demanda de servicio de un conjunto de clientes sobre una red de transporte. Las diferentes características de los clientes, la demanda, los almacenes y los vehículos, así como las restricciones operativas sobre las rutas, horarios, etc., dan lugar a gran número de variantes del problema.

El primer gran problema que aparece en la optimización logística es la enorme variedad de problemas a resultados de todas las variantes comentadas en clientes, flota, demandas, almacenes y demás. La siguiente lista proporciona la descripción técnica y características principales de tan solo algunos problemas de rutas identificados en la literatura científica:

1. Problema del viajante de comercio o *Travelling Salesman Problem* (TSP). Hay un único vehículo, con capacidad suficiente para visitar exactamente una única vez a cada cliente

de un conjunto de n clientes o puntos. Se trata de visitar los n clientes con la ruta más corta. El TSP es un problema teórico muy estudiado en la literatura científica con miles de artículos publicados.

2. Problema de rutas de vehículos con capacidades idénticas o *Capacitated Vehicle Routing Problems* (CVRP). Es una extensión del TSP donde todas las rutas parten de un nodo central (almacén). Todos los vehículos son idénticos con la misma capacidad y se asigna, a cada uno, una ruta de manera que no se exceda la capacidad y para que la distancia total recorrida por todas las rutas sea la mínima.
3. Problema de rutas de vehículos con capacidades y flota heterogénea o *Heterogeneous Fleet Capacitated Vehicle Routing Problem* (HFCVRP). Una extensión del CVRP donde cada camión es potencialmente diferente y con capacidades heterogéneas. Aparece el problema adicional de decidir a qué camión se asigna cada ruta.
4. Problema con recogidas o *Vehicle Routing Problem with Backhauls* (VRPB). Los vehículos no solo parten llenos del depósito y se van vaciando, sino que puede haber clientes a los que hacer recogidas. Aparecen problemas de orden de llenado/vaciado y de control de la carga del camión.
5. Problemas de vehículos con ventanas horarias o *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW). Cada cliente o punto tiene asociada una ventana horaria en la cual debe ser visitado. Aparecen enormes problemas de cálculo de tiempos de tránsito (posiblemente con condicionantes de tráfico y señalización/semaforización) y de factibilidad de rutas.
6. Problemas con múltiples almacenes o *Vehicle Routing Problem with Multiple Depots* (VRPMD). En este caso hay varios almacenes y los vehículos pueden estar (o no) asignados a un almacén de origen y/o destino. Cada ruta puede partir y terminar en un almacén.

Para cada uno de los problemas anteriores, los cuales suponen tan solo el 1-2% de los problemas identificados en la práctica, se podrían listar centenares de estudios científicos (Golden, Raghavan y Wasil, 2008). Además, si usted ha leído la lista anterior con detenimiento, muy probablemente habrá concluido que su problema logístico tiene, además, elementos de casi todos los puntos mencionados. Con esto podemos tener problemas con una notación kilométrica como podría ser "HFCVRPTWMD" en el caso de disponer de varios almacenes, una flota heterogénea, recogidas y entregas, ventanas horarias y demás. El primer gran problema es pues que los problemas de rutas son extremadamente variados.

El segundo gran problema es la complejidad de los problemas resultantes. Estudiemos el que es quizá el ejemplo más sencillo: el problema del viajante de comercio o TSP. Supongamos que tratamos el reparto capilar urbano de un único repartidor en una furgoneta, que tiene que atender, por ejemplo, 10 entregas. Al repartidor se le paga un coste fijo más un variable. El variable depende de los kilómetros que se hagan durante la jornada. Por tanto, interesa que el repartidor haga las 10 entregas en el mínimo kilometraje posible. Tenemos pues que encontrar la ruta más corta que pasa por 10 pun-

tos dentro de la ciudad. Nótese que únicamente con un navegador tipo Tom-Tom no es suficiente, dado que nos daría la ruta más corta entre cada par de puntos, pero el orden de visitado de los puntos lo deberíamos establecer previamente. Uno puede pensar que este problema de fijar el orden de visitado de los puntos es muy sencillo: Se ponen los 10 puntos en un mapa y se “unen los puntos” intentando hacer arcos lo más cortos posible. Esto no es tan sencillo, pues el sentido de circulación de las calles evita que podamos trazar líneas rectas entre los puntos. Además, tenemos un gran número de posibles secuencias de visitado. Podríamos visitar a los clientes en orden: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10. O podríamos hacer 2, 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10. En general, dados n clientes, tenemos tantas posibles órdenes como posibles ordenaciones o permutaciones de estos. Es decir, tenemos $n!$ posibles secuencias de visitado de clientes. Para el ejemplo con 10 clientes tendríamos nada menos que $10! = 3.628.800$ posibles secuencias. ¡Casi 4 millones! Si tenemos un caso más real, por ejemplo, con 25 entregas en una jornada, el número de secuencias sube a ¡casi 16 billones de billones! Lo cual es una auténtica barbaridad. Recordemos que estamos hablando del sencillo problema del viajante de comercio o TSP. Un problema mucho más real como el HFCVRP tiene una complejidad incluso mayor. Optimizar estos problemas supone un reto computacional y explica, en gran parte, el interés por parte de la comunidad científica.

El tercer gran problema son los datos de entrada que se necesitan para resolver los problemas de rutas. Básicamente, hasta mediados de los años 90, las empresas han venido trabajando con mapas en

papel y con guías de carreteras para resolver problemas de reparto. La aparición de sistemas GIS, a principios de los años 2000, de propósito general han supuesto una revolución en este sentido. Los navegadores “turn-by-turn” son capaces de proporcionar la ruta más corta entre dos puntos, lo que supone los datos de entrada para los algoritmos de optimización logística. Enlazando con el ejemplo anterior, el dato de entrada de un TSP es la matriz de distancias que contiene los caminos mínimos entre cada par de clientes ($n \cdot (n-1)$ distancias mínimas). La disponibilidad de Microsoft Bing o Google Maps permite el cálculo de estas distancias. Para entender la cantidad de datos necesarios se muestra la Figura 1.

Se observa un callejero que podemos ver en Google Maps, por ejemplo. Debajo de ese callejero hay una representación de nodos y arcos dirigidos (grafo) donde cada arco está etiquetado, entre otras cosas, con el tiempo y la longitud del tramo. A partir de Google Maps podemos, por ejemplo, y usando este grafo, calcular la distancia mínima entre dos direcciones de una ciudad. No obstante, con Google Maps no podemos fácilmente resolver el problema TSP anteriormente mencionado. Además, esta disponibilidad de sistemas GIS llegó tarde, dado que la comunidad científica llevaba desde mediados de los años 50 estudiando los problemas de rutas. Una dificultad adicional es que la comunidad científica asume mayoritariamente que las distancias entre cada par de puntos son simplemente “líneas rectas”, lo que se conoce como distancias Euclídeas. Las rutas resultantes con distancias Euclídeas se alejan mucho de la realidad, como muestra la siguiente Figura 2.



Figura 1: Sección de un callejero (izquierda). Representación en forma de grafo superpuesto (centro). Grafo final resultante sobre el que se hacen los cálculos logísticos (derecha).

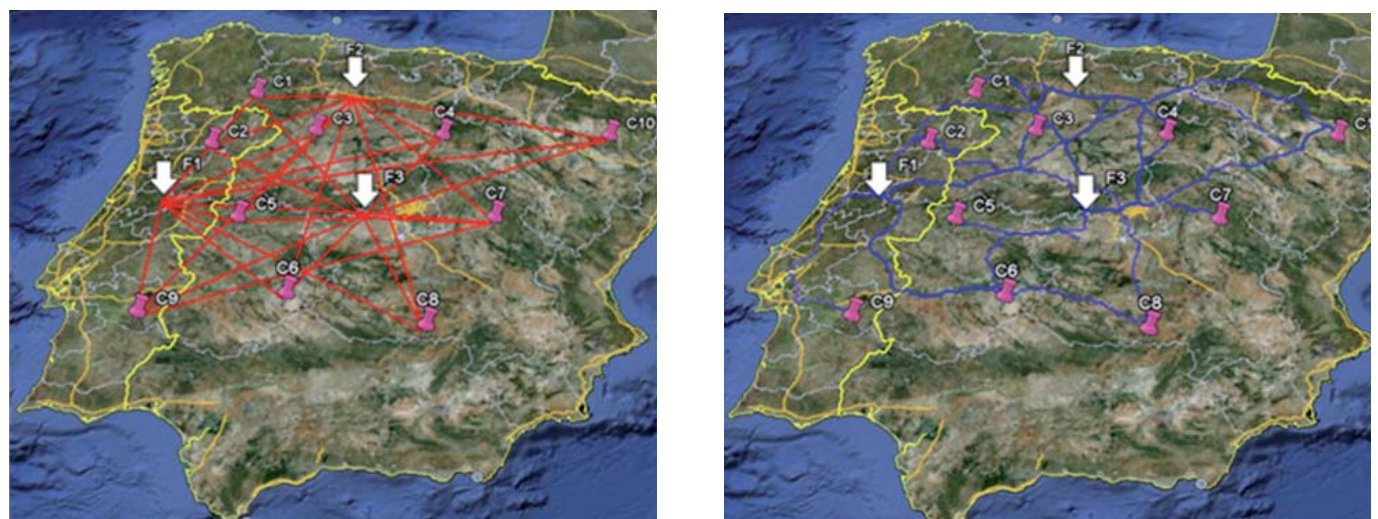


Figura 2: Ejemplo de problema de rutas con 10 clientes (C1, C2... C10) y tres almacenes (F1, F2 y F3). Rutas Euclídeas en rojo (izquierda) y rutas reales en azul (derecha).

Además de los recursos financieros, no cabe duda de que la ciencia, la tecnología y la formación son los pilares fundamentales de una economía basada en el conocimiento. Durante los últimos 60 años, los investigadores han dedicado un enorme esfuerzo a los problemas de rutas. La literatura científica en este campo es muy extensa y se han desarrollado notablemente las técnicas de investigación operativa, informática y computación. En la actualidad ya se dispone del conocimiento y de la tecnología suficiente para abordar problemas de rutas de tamaño real.

No obstante, y a resultas de los tres grandes problemas anteriores (variedad, complejidad y necesidad de datos) aparece el cuarto y último gran problema: el coste. Desarrollar desde cero una herramienta informática para la optimización de rutas para cada posible empresa y problema específico no es viable. De ahí la situación actual en la que, aun teniendo los conocimientos científicos, las empresas siguen resolviendo los problemas de optimización de rutas a mano o, en el mejor de los casos, con el apoyo de sistemas GIS.

La solución nos la da una combinación de tres factores: 1) Las últimas tecnologías en materia de desarrollo de aplicaciones informáticas avanzadas, mediante el uso de WebServices y la generalización de la metodología de desarrollo orientado a objetos a aplicaciones totalmente modulares compuestas de decenas de programas independientes. Esto permite desarrollar aplicaciones muy complejas a partir de "plantillas" y de desarrollos acumulativos. 2) El desarrollo de algoritmos de optimización generales que permiten resolver grandes familias de problemas de rutas con muy pocos cambios. 3) El uso de las últimas tecnologías de computación paralela y programación multi-hilo, capaces de aprovechar los modernos procesadores con 4 o más núcleos de cómputo, resultando en soluciones rápidas para problemas de rutas de tamaño real. En otras palabras, hablamos de software estado del arte, del que RoutingMaps es un claro exponente.

3. Routingmaps: La solución avanzada del ITI para la optimización logística

RoutingMaps es un sistema software de muy fácil uso pensado para resolver problemas reales de rutas de vehículos. Actualmente

en su versión 2.0, está desarrollado con las últimas tecnologías en lenguaje C# 3.0 bajo la plataforma .NET en su versión 4.0 de Microsoft. La aplicación va mucho más allá de las tres típicas capas de interfaz de usuario, lógica de negocio y acceso a datos, dado que incorpora múltiples capas. Cada capa no conoce siquiera la existencia de las demás y simplemente solicita servicios y publica sus propios servicios para que el resto de capas o módulos los utilicen. De esta manera, ampliar y/o adaptar RoutingMaps a otros entornos o problemas de rutas supone un esfuerzo mínimo. Además, en todas las etapas del desarrollo de RoutingMaps se emplean las últimas tecnologías. Por poner un ejemplo, el ITI ha llevado a cabo campañas de testeo, desde testeo unitario a testeo de aceptación, usando las últimas metodologías disponibles. El resultado es una aplicación fácil de usar, robusta y ágil, que permite resolver problemas reales de rutas de manera eficaz y eficiente usando ordenadores comunes de sobremesa, sin requerir grandes servidores ni centros de cálculo.

La aplicación tiene más de 80 módulos, aunque los más importantes son los siguientes:

1. Módulo de acceso a datos. El uso de la tecnología NHibernate permite definir la estructura de datos a partir de los objetos usados en la aplicación, lo cual abstrae totalmente la aplicación de la especificación de la base de datos y permite a RoutingMaps utilizar cualquier fuente SQL disponible. La aplicación no queda ligada a ningún servidor específico de base de datos ni a ninguna tecnología ni drivers de acceso a datos concretos. Esto también facilita enormemente la implantación.
2. Módulo cartográfico. Proporciona las capacidades GIS al resto de módulos. Actualmente están soportados los motores Microsoft Bing y Google Maps. Añadir nuevos motores supone un esfuerzo mínimo de desarrollo.
3. Módulo de geolocalización. A partir del listado de clientes, con sus direcciones, se permite geolocalizar (posicionar en el mapa, con la latitud y la longitud) de forma masiva y en muy poco tiempo, toda la cartera de clientes. Una captura de ejemplo de este módulo se muestra en la Figura 3.

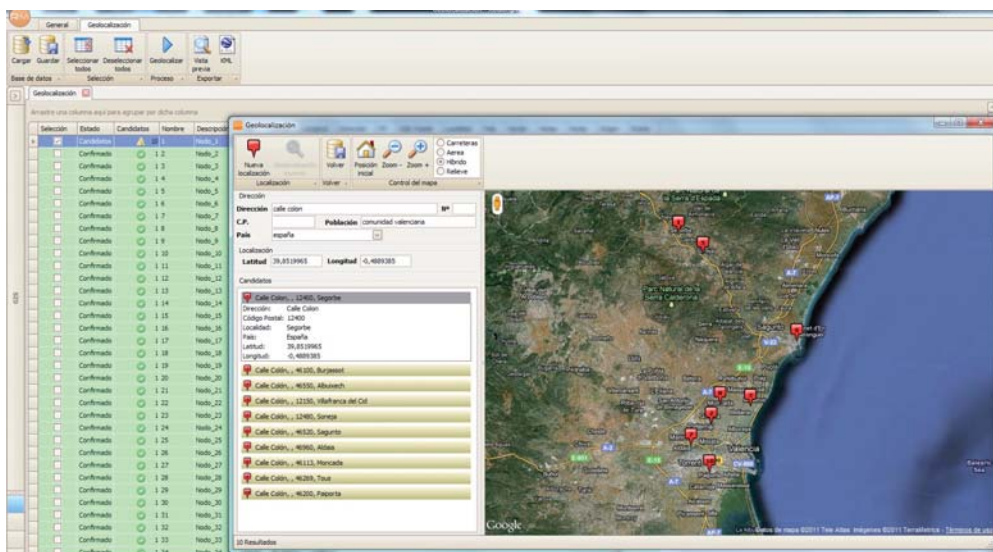


Figura 3: Módulo de geolocalización masiva de RoutingMaps en funcionamiento.

4. Módulo de cálculo de distancias. Se trata de un módulo muy avanzado. Aquí se calculan los caminos mínimos entre cada par de clientes de la base de datos. Si se tienen 1.000 clientes, son necesarias nada más y nada menos que 1 millón de distancias mínimas. El uso de las más modernas tecnologías y la arquitectura avanzada de RoutingMaps permiten hacer estos cálculos en minutos, en vez de los típicos días que serían necesarios. Una captura de este módulo se muestra en la Figura 4.
5. Módulo de gestión de flotas, escenarios, clientes y entregas. Aquí se desarrollan todas las necesidades y recursos disponibles que generan el escenario de rutas a resolver. Se puede ver una captura de ejemplo en la Figura 5.
6. Asistentes para la resolución de diversos problemas de rutas. A partir de todos los datos anteriores, que se agrupan en escenarios, se aplican potentes algoritmos de rutas para su resolución. Se muestran varias capturas en las Figuras 6 y 7.

Como se puede ver, RoutingMaps es una aplicación actual, que aún a las últimas tecnologías informáticas con los últimos desarrollos en lo que se refiere a algoritmos de optimización estado del arte.

4. Esto solo es el principio. Desarrollos futuros

Actualmente, RoutingMaps es capaz de resolver problemas reales de rutas de vehículos con flotas heterogéneas y restricciones de capacidad, tiempo y duración máxima de las rutas, entre muchas otras cosas. Los resultados, ya obtenidos, a lo largo de convenios con distintas empresas de varios sectores (incluyendo distribución) son muy prometedores y se observan mejoras muy relevantes en ahorros de costes, tiempos de cálculo y mejora general de la organización logística. En cualquier caso, esto es tan solo el comienzo y hay muchas otras posibilidades y mejoras en curso. La tecnología está disponible y solo hace falta el interés para desarrollarla. Para las siguientes versiones, RoutingMaps resolverá problemas mucho más complejos, que incorporen ventanas de entrega, múltiples almacenes y otras restricciones. Un reto adicional aparece en la posibilidad de resolver problemas de planificación donde se decide, dentro de un horizonte de tiempo, cuándo hay que visitar a un cliente.

Otros desarrollos aparecen en la mercadotecnia. La Figura 8 muestra el efecto de calcular áreas de influencia reales, siguiendo la red logística a la hora de localizar un bien y/o servicio. Las áreas "Euclídeas" proporcionan una información distorsionada de la realidad.

La Figura 9 muestra el resultado de avanzadas técnicas de visualización de datos logísticos como flujos, cantidad de materiales transportados, etc. Se puede decir que, con los modernos sistemas GIS y RoutingMaps, las posibilidades son virtualmente infinitas.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha puesto de manifiesto la importancia capital que tiene la logística para las empresas españolas y cómo se trata de un problema de difícil solución, principalmente debido a la enorme variedad de problemas de distribución posibles, la complejidad algorítmica de los modelos de optimización subyacentes y las necesidades de datos.

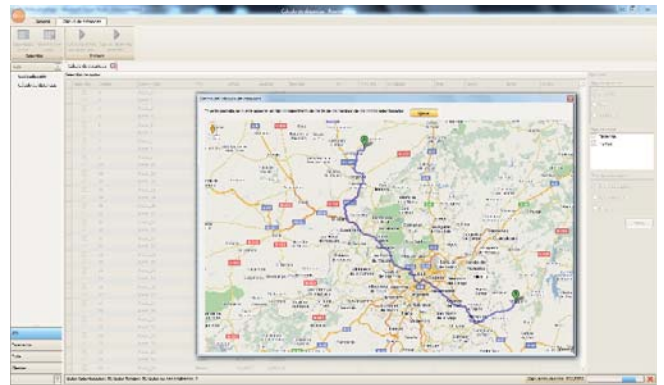


Figura 4: Módulo de cálculo masivo de distancias de RoutingMaps en funcionamiento.

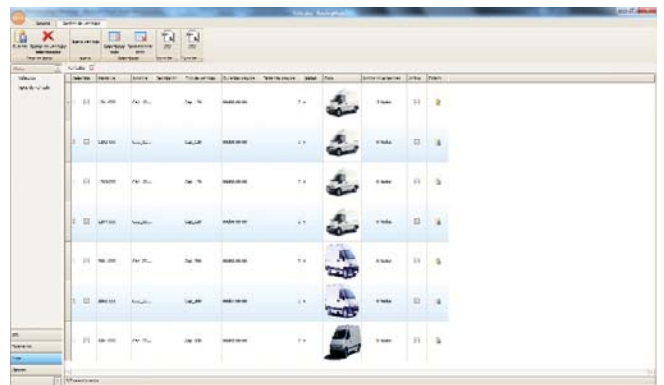


Figura 5: Módulo de flotas de RoutingMaps en funcionamiento.

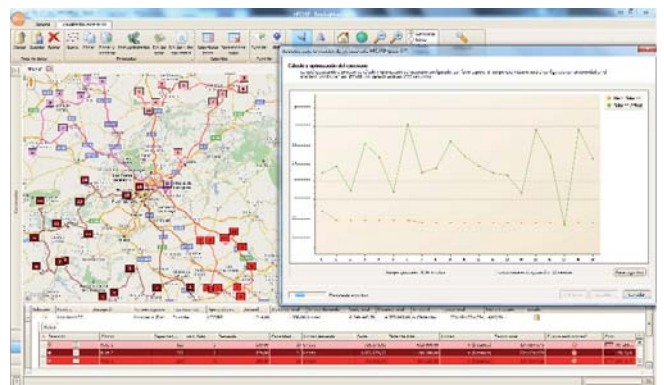


Figura 6: Módulo de cálculo de rutas, proceso de optimización de RoutingMaps en curso.



Figura 7: Resultado de la optimización de rutas de RoutingMaps, visualizando resultados y trabajando con el escenario.



Figura 8: Localización de bienes y servicios. Área "irreal" representada por un círculo azul y área real representada por el alcance logístico en verde (izquierda). Representación tridimensional de dos áreas disjuntas por alcance en red logística (derecha).

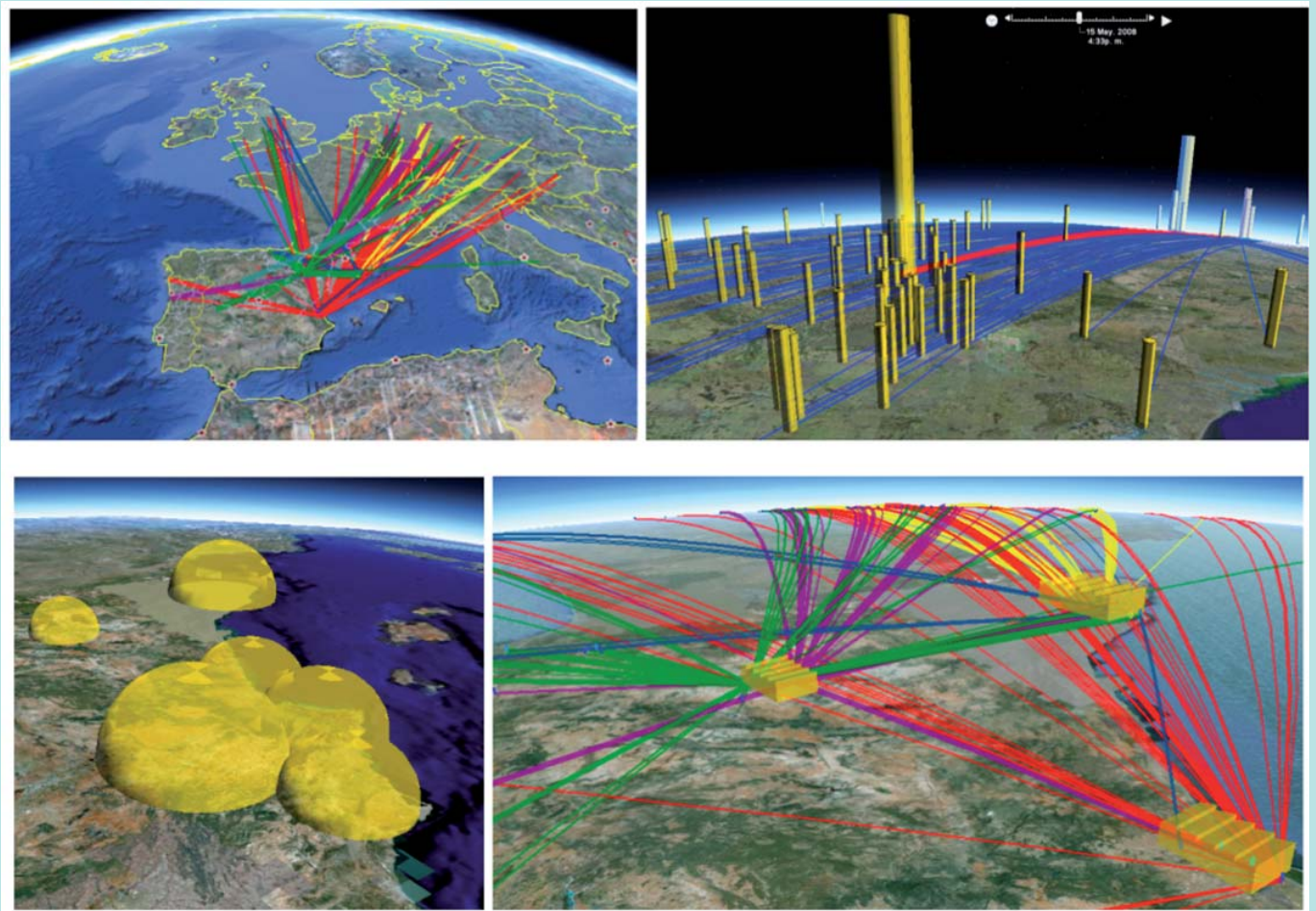


Figura 9: Representación avanzada de flujos logísticos.



Figura 10: Logotipo de la aplicación RoutingMaps. <http://www.routingmaps.com>.

Se ha expuesto, no obstante, que el avance de la ciencia y las técnicas de computación, con conjunción con los modernos sistemas GIS actuales, permiten resolver problemas reales de rutas de manera eficaz y eficiente, para lo cual es necesario un software moderno y avanzado, que supone una verdadera punta de lanza en el sector. Este software es RoutingMaps (Figura 10), del que hemos hablado someramente en estas páginas.

En estos momentos, el ITI está trabajando en numerosos proyectos de investigación y desarrollo para ampliar las capacidades funcionales y algorítmicas de RoutingMaps, así como colaborando con varias empresas del sector como DIA, CONSUM, CESP (grupo Ferrovial), AURENSIS y Grupo SEHRS, entre muchas otras, para la utilización de RoutingMaps en la resolución de sus problemas diarios de rutas. Estamos convencidos de que estos suponen tan solo un comienzo y el uso de avanzadas herramientas de optimización se generalizará en los próximos años, posibilitando con ello un extendido aumento de la productividad y de la eficiencia. Desde nuestro punto de vista, RoutingMaps es un ejemplo claro de una exitosa transferencia tecnológica desde el campo de la investigación a la práctica.

BIBLIOGRAFÍA

De Frias, M. (2006). *La importancia del transporte de personas y mercancías*. Informe técnico. Ministerio de Fomento, Madrid.

Fomento (2010). *Observatorio de mercado del transporte de mercancías por carretera*. Informe técnico. Nº 19. Centro de publicaciones. Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento.

Fomento y Consultora Spim (2008). *Estudio de costes del transporte de mercancías por carretera*. Informe técnico. Ministerio de Fomento, Madrid.

Fomento y Consultrans (2001). *Estudio socio-económico del sector del transporte por carretera*. Informe técnico. Ministerio de Fomento, Madrid.

Golden, B., Raghavan, S. y Wasil, E. (2008) "The Vehicle Routing Problem, Latest Advances and New Challenges". Springer, New York.

Laporte, G. (2007). "What you should know about the vehicle routing problem". *Naval Research Logistics*, 54(8):811-819.

Toth, P. y Vigo, D. (2002). "An overview of vehicle routing problems". Capítulo 1 de *The Vehicle Routing Problem*, libro editado por Toth, P. y Vigo, D. SIAM, Society for Industrial and Applied Mathematics. Philadelphia, USA.

