

Aplicación de la Teoría de Grafos para mejorar la planificación de rutas de trabajo de una empresa del sector de la distribución automática

PUCHADES CORTÉS, VANESA

Semacaf Máquinas de Café S.L.

Correo electrónico: semacaf@alcoi.com

MULA BRU, JOSEFA

Centro de Investigación de Gestión e Ingeniería de Producción

Universidad Politécnica de Valencia

Correo electrónico: fmula@cigip.upv.es

RODRÍGUEZ VILLALOBOS, ALEJANDRO

Departamento de Organización de Empresas

Universidad Politécnica de Valencia

Correo electrónico: arodriguez@doe.upv.es

RESUMEN

En la actualidad, la gestión de rutas es un aspecto fundamental en las empresas cuya actividad se basa principalmente en el transporte, ya que supone elevados costes de carburantes, mano de obra, etc. En este artículo, se estudia el caso de la empresa Semacaf Máquinas de Café S.L., perteneciente al sector de la distribución automática, que quiere evaluar la efectividad de su política actual de rutas y compararla con la política óptima obtenida mediante las aplicaciones informáticas *Grafos* y *Rutas*, basadas en algoritmos pertenecientes a la Teoría de Grafos.

En este trabajo se aplica el algoritmo del Problema del Viajante, que se adapta a las características del problema de la empresa y que cumple los objetivos de minimizar los costes anteriormente mencionados, así como de evaluar la política actual de gestión de rutas de la empresa.

Palabras clave: Teoría de Grafos; planificación de rutas; problema del viajante; sector del vending.

Clasificación JEL: C61; L00.

2000MSC: 90B10; 90B90.

An application of Graph Theory to improve the planning of work routes for a company in the vending sector

ABSTRACT

Currently, the routing management is an important aspect in those companies whose activity is mainly based on the transport, since it involves high costs of fuel, manpower, etc. In this paper, the case of the company Semacaf Máquinas de Café S.L. is studied. This company belongs to the sector of automatic distribution and pursues to evaluate the effectiveness of its current policy about planning routes and to compare it with the optimal policy obtained through the software applications, *Grafos* and *Rutas*, based on algorithms belonging to Graph Theory.

In this paper, the Traveling Salesman Problem (TSP) is applied, due to the characteristics of the problem and because it accomplishes the objectives of minimizing the previously mentioned costs, as well as evaluating the current policy of routing management of the company.

Keywords: Graph Theory; routing planning; travelling salesman problem; vending sector.

JEL classification: C61; L00.

2000MSC: 90B10; 90B90.



1 Introducción

Actualmente, la Teoría de Grafos permite esquematizar y resolver muchos problemas en diferentes campos de la ciencia y la tecnología. En particular, también se viene utilizando dicha teoría para modelar y resolver distintos problemas referidos a la eficiencia del transporte.

Los problemas de rutas de vehículos o de distribución física de mercancías desde almacenes a clientes aparecen en la literatura científica como *Vehicle Routing Problems*, o más comúnmente como VRP. También se puede encontrar, aunque en menor medida, referencias como *Vehicle Scheduling Problems*. En términos generales, un problema de rutas de vehículos consiste en determinar las rutas de un conjunto (o flota) de vehículos que deben iniciar un recorrido (y finalizarlo) en los almacenes (o depósitos) para atender la demanda de servicio de un conjunto disperso de clientes sobre una red.

El transporte es uno de los sectores que más aporta a la generación de riqueza (desde hace años, por encima del 5% del valor añadido bruto nacional de España). El transporte por carretera muestra un comportamiento netamente superior al resto de los modos y actividades de transporte (ferroviario, marítimo y aéreo) en cuanto a generación de valor por parte de los operadores españoles. Por el contrario, el sector del transporte está integrado en su mayoría por pequeñas empresas, con desigual situación frente a la formación de sus trabajadores. Una gran parte del tejido empresarial se mantiene con estructuras anticuadas en su funcionamiento y la formación no forma parte de su cultura. Según Ministerio de Fomento (2001), el equipamiento informático del sector es escaso y su hábito de uso mínimo.

En este artículo se expone el método actual de gestión de rutas llevada a cabo por la empresa objeto de la aplicación: una empresa de *vending*, cuyo negocio consiste en la distribución de productos de consumo para máquinas expendedoras automáticas (aperitivos, café, bebidas y refrescos, etc.). Como otras pymes, esta empresa está sujeta a la incertidumbre del mercado (en términos de consumo, coste de los combustibles, complejidad de planificación, etc.) y le resulta particularmente interesante la integración de las herramientas más adecuadas para la resolución de sus problemas de gestión de rutas. En concreto, el caso real presentado servirá para demostrar cómo las técnicas de investigación operativa relativas al cálculo de rutas y el uso de tecnologías de la información pueden ayudar a contrarrestar los desequilibrios existentes entre la importancia del sector y su capacidad-calidad de servicio.

Para ello, en este trabajo fue necesario analizar todos los factores que se tienen en cuenta a la hora de elaborar las rutas diarias de cada operario: la planificación inicial de las rutas llevada a cabo por el jefe de taller y la encargada de control y gestión de los equipos, así como los cambios llevados a cabo por los operarios en esta ruta decidiendo el orden de las visitas en base a diferentes factores no considerados en la determinación de la ruta inicial, tales como: el consumo diario actual del cliente, la zona geográfica, las necesidades específicas del cliente, la comodidad, el tráfico, etc.

Este estudio pretende acercar a las pymes la utilidad y bondad de las técnicas de investigación operativa (en ocasiones más próxima a la investigación científica pura que a la realidad cotidiana de las empresas). Una de las aportaciones de esta investigación es cuantificar el grado de mejora potencial en términos de reducción de costes en una empresa del sector de la distribución (*vending*). Además, en esta ocasión se utilizará un novedoso software de planificación de rutas y gestión de flotas.

El documento se ha estructurado de la siguiente forma. En la Sección 2 se resumen los modelos principales basados en la Teoría de Grafos con los que puede afrontarse el problema tratado en la presente publicación y otros similares; además, se justifica la selección del modelo usado y su implantación en la empresa. La Sección 3 sirve para comentar brevemente las herramientas utilizadas para la obtención de la ruta óptima. La Sección 4 describe el caso de estudio; una primera parte se dedica a la planificación actual de las rutas de trabajo de la empresa y después se plantea la propuesta de mejora para la planificación de rutas actual de la empresa. Finalmente, en la Sección 5 se exponen las conclusiones obtenidas a lo largo de este trabajo y las líneas futuras de actuación.

2 Revisión de modelos basados en la Teoría de Grafos

Los historiadores de la ciencia y de las matemáticas establecen el inicio de la Teoría de Grafos con el trabajo de Euler (1736). En 1852, Francis Guthrie formuló el problema de los cuatro colores para colorear un mapa cartográfico. Este problema puede considerarse como el más famoso y productivo de la Teoría de Grafos e hizo que un gran número de matemáticos, tales como Cayley, Hamilton, De Morgan, Kempe, Tait o Ramsey, se preocupasen por estudiar y desarrollar esta teoría. Sin embargo, se tardó más de un siglo en demostrar su resultado (Appel y Haken, 1977a,b), lo que requirió del uso de ordenadores potentes para su consecución. Por su parte, Hierholzer (1873) proporcionó una caracterización de los grafos denominados eulerianos como aquellos que son

conexos y todos sus nodos tienen valencia par. No obstante, el término “grafo” es introducido por primera vez en el trabajo de Sylvester (1878). A continuación se revisan los modelos correspondientes a dos grandes grupos de problemas basados en la programación lineal.

Por una parte, están los problemas de transporte, asignación y transbordo, que forman parte de los problemas de flujo de red (Taha, 2004):

- Problema de transporte: trata una situación en la cual se envía un bien desde uno o varios puntos de origen hasta uno o varios puntos de destino con el objetivo de determinar la cantidad enviada, satisfaciendo al mismo tiempo las restricciones de la oferta y la demanda, y minimizando el coste total del envío. Este problema también se caracteriza por suponer que el coste de envío en una ruta determinada es directamente proporcional al número de unidades enviadas en esa ruta. En lo referente a su resolución, se utiliza el algoritmo de transporte. El algoritmo de transporte es un método de resolución para problemas de transporte que emplea el método simplex. La segunda fase del algoritmo (es decir, obtener una solución básica inicial del problema) utiliza habitualmente alguno de estos tres métodos (Winston, 2005): método de la esquina noroeste; método del coste menor; y método de aproximación de Vogel. La diferencia entre los tres métodos es la “calidad” de la solución básica inicial que producen, en el sentido de que una mejor solución inicial proporciona un valor objetivo más pequeño. En general, el método de Vogel genera la mejor solución básica inicial y el método de la esquina noroeste la peor, aunque la ventaja de este último es que implica menos cálculos (Taha, 2004). En cuanto a las variantes que podrían surgir en este tipo de problemas, éstas pueden ser (Hillier y Lieberman, 2006): suministro total no igual a la demanda total, maximización de la función objetivo, rutas con capacidad limitada y rutas no aceptables. En general, este problema puede aplicarse en más áreas de la empresa, como, por ejemplo, el control de inventarios, los horarios de empleo y la asignación de personal. No obstante, para este último la resolución mediante el método simplex no es la mejor alternativa debido a que el problema se formula con un modelo de programación lineal entera.

- Problema de asignación: tiene una estructura similar al problema de transporte en el cual se trata de asignar el mejor recurso para cada tarea. Los problemas de asignación poseen métodos de resolución mucho más eficaces que los de transporte

en general. Al igual que en el problema del transporte, en este problema también se observan casos especiales (Anderson *et al.* 2004): oferta y demanda desiguales, problemas de maximización y problemas con asignación inaceptable.

- Problema de transbordo: determina cuántas unidades deberán embarcarse por cada uno de los arcos de la red, de manera que todos los nodos de la red se satisfagan al coste mínimo de transporte. Al igual que en los problemas de transporte y asignación, se puede formular este tipo de problemas con varias variantes, como son por ejemplo (Anderson *et al.* 2004): suministro total no igual a la demanda total, maximización de la función objetivo, rutas con capacidad limitada y rutas inaceptables.

- Problema del viajante, es un caso particular de los problemas de transporte, que trata de determinar el recorrido que, comenzando por una determinada ciudad, pase por todas las demás una sola vez y vuelva finalmente a la primera, de manera que se minimice la distancia total recorrida. Algunos de los elementos principales de esta tipología de problemas son: la red de transporte (red de carreteras en este caso), la flota de vehículos, la situación geográfica de los clientes, la ubicación del centro operativo, los servicios a atender (demandas y/o consumos) etc.

Las características diferentes de los clientes, la demanda, los almacenes y los vehículos, así como de las restricciones operativas sobre las rutas, horarios, etc. dan lugar a gran número de variantes del problema. En la literatura, algunos autores han intentado clasificar y simplificar la gran variedad de posibles problemas, como por ejemplo los criterios propuestos por Bodin y Golden (1981) y Desrochers *et al.* (1990), que intentan reflejar y ordenar las características principales en aspectos tales como: el almacén o depósito, la flota, la demanda, el servicio y el objetivo a alcanzar. Esta clasificación de los problemas ha facilitado tanto el desarrollo de modelos matemáticos y estrategias de resolución como la toma de decisiones por parte de las empresas.

Por otra parte, se ha realizado una síntesis de los tipos de problemas englobados en los modelos de optimización de redes. Los problemas de redes surgen en una gran cantidad de situaciones (redes de transporte, eléctricas, comunicaciones, etc.) y en áreas tan diversas como producción, distribución, localización de instalaciones, administración de recursos, etc. (Hillier y Lieberman, 2006):

- Problema del árbol de expansión mínima: persigue unir los nodos de una red,

directa o indirectamente, buscando la longitud más corta en las ramas de conexión. Uno de los algoritmos empleados para resolver este tipo de problemas es el algoritmo de Kruskal, cuyo objetivo es construir un árbol formado por arcos sucesivamente seleccionados de mínimo peso a partir de un grafo ponderado en los arcos. La aplicación típica de este problema es el diseño de redes telefónicas en oficinas con el mínimo coste total, aunque también se utiliza para el diseño de redes de transporte, el diseño de redes de telecomunicaciones, TV por cable, sistemas distribuidos, interpretación de datos climatológicos, etc.

- Problema de la ruta más corta: busca el camino mínimo entre un punto de origen y un punto de destino en una red (en nuestro caso, de transporte). Este problema también permite modelar otras situaciones como por ejemplo minimizar el coste total de una secuencia de actividades (reemplazo de equipos), minimizar la distancia total recorrida (confiable) o determinar la mejor ruta. Además, tiene en cuenta las probabilidades de que ocurra o no un suceso

- Problema de flujo máximo: su objetivo es transportar la cantidad máxima de flujo desde un punto de partida hasta un punto final. Es importante conocer la capacidad de la red para saber cuánto puede enviarse desde un nodo fuente a un nodo destino, aunque esto también puede hacerse definiendo los cortes; es decir, la capacidad de corte es igual a la suma de las capacidades de los arcos asociados, y entre todos los cortes posibles en la red, el corte con la capacidad menor proporciona el flujo máximo en la red. Son muchas las situaciones que pueden modelarse mediante una red con índice máximo de flujo, como por ejemplo, los movimientos de tráfico, los sistemas hidráulicos, los circuitos eléctricos, los transportes de mercancías, las capacidades de redes telemáticas, etc.

- Problema del flujo restringido de coste mínimo: busca determinar los flujos en los diferentes arcos, minimizando el coste total, al mismo tiempo que satisface las restricciones del flujo en los arcos y las cantidades de la oferta y la demanda en los nodos. En cuanto a las aplicaciones de este problema en la vida real, se encuentran por ejemplo en la comercialización de productos en una red de producción-distribución, la programación del empleo, etc.

En último lugar se describen brevemente los métodos CPM (*Critical Path Method*) y PERT (*Program Evaluation and Review Technique*). Según Taha (2004), CPM y PERT son métodos basados en redes y diseñados para ayudar en la

planificación, programación y control de proyectos, cuyo objetivo es proporcionar los medios analíticos para programar las actividades. La diferencia principal entre PERT y CPM es la manera en que se realiza la estimación de tiempo. PERT supone que el tiempo para realizar cada una de las actividades es una variable aleatoria descrita por una distribución de probabilidad, mientras que CPM infiere que los tiempos de las actividades se conocen en forma determinista y se pueden variar cambiando el nivel de los recursos utilizados. Estos métodos se utilizan para la planificación y control de diversas actividades, tales como: construcción de presas, apertura de caminos, pavimentación, construcción de casas y edificios, reparación de barcos, investigación de mercados, movimientos de colonización, estudios económicos regionales, auditorías, planificación de carreras universitarias, distribución de tiempos de salas de operaciones, ampliaciones de fábrica, planificación de itinerarios para planes de venta, censos de población, etc.

Dadas las características del caso de estudio, el modelo de análisis que más se adapta a sus necesidades y que, por tanto, se aplica para la obtención de la ruta óptima, es el problema del viajante, ya que el objetivo de este modelo es encontrar en qué orden deben recorrerse los nodos de la red de modo que se minimice la distancia total recorrida. Además, se cuenta con facilidad para encontrar software implementando el algoritmo.

3 Herramientas propuestas

En este trabajo se han utilizado dos herramientas para la obtención de la ruta óptima: *Grafos* y *Rutas*. La herramienta *Grafos* es un software desarrollado por Rodríguez-Villalobos (2008) para la construcción, edición y análisis de grafos. Abarca toda clase de problemas relacionados con la Teoría de Grafos, y otras disciplinas relacionadas como la ingeniería de organización industrial, la logística y el transporte, investigación operativa, diseño de redes, etc., por lo que se puede utilizar para el modelado y resolución de problemas reales. La herramienta *Rutas* (Rodríguez-Villalobos, 2008) permite capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar visualmente en un mapa la información geográficamente introducida, que servirá posteriormente para resolver una parte del problema planteado. El objetivo de esta aplicación es el desarrollo de una herramienta informática de características profesionales que permita la resolución de problemas reales de flotas de vehículos capacitados o CVRP (*Capacitated Vehicle*

Routing Problems), el cálculo de rutas y su gestión. Algunos ejemplos de sus posibles aplicaciones son: localización de clientes; centros de tránsito y almacenes; cálculo y gestión de distancias, tiempos y costes de transporte; gestión de flotas de vehículos; reducción de costes y tiempos de transporte; exportar información sobre localizaciones e itinerarios para otro software cartográfico (*Google Earth, OziExplorer, GPS Visualize*, etc.). Ambas aplicaciones resuelven problemas relacionados con la Teoría de Grafos, en la cual se basa este trabajo, aunque cada una de ellas ha servido para proporcionar por una parte la información necesaria para la localización de los clientes y la distancia entre ellos (*Rutas*) y los resultados que han facilitado la obtención de la ruta óptima (*Grafos*).

4 Caso de estudio

Semacaf Máquinas de Café S.L. es una pyme perteneciente al sector de la distribución automática, cuya actividad empresarial es la compra y distribución de máquinas *vending* y de agua refrigerada. Esta actividad pone a disposición del consumidor una amplia gama de productos a través de un nuevo modelo de distribución, constituyendo al tiempo, un punto de vista diferenciado de lo tradicional, puesto que no requiere la presencia humana de un vendedor. Es un sistema mucho más agresivo que se instala en los propios ámbitos de trabajo, ocio, colectividades y tránsito de la población, disponiendo de un horario extenso y con niveles de higiene y calidad equiparables, como mínimo, a los de los establecimientos convencionales

La empresa objeto de estudio distribuye sus máquinas principalmente en entornos laborales, centros públicos y privados y en empresas dedicadas al sector servicios. Cualquier empresa del mercado se enfrenta a variables externas que afectan su gestión. En el caso de estudio, destaca la tendencia en los precios de los productos energéticos, ya que la actividad de la empresa supone un desplazamiento continuo de todos los operarios a todos los clientes. El estudio realizado se basa en la media de los precios del carburante en el periodo estudiado (enero, febrero y marzo de 2007), aunque actualmente éstos se han incrementado en un 30%, aproximadamente. A continuación, la Figura 1 refleja la evolución de los precios del carburante desde el año 2001, destacando el incremento constante de los precios y el continuo acercamiento del precio del gasóleo al de la gasolina.

Céntimo/ €

MEDIA ANUAL DE LOS PRECIOS DE LOS CARBURANTES.

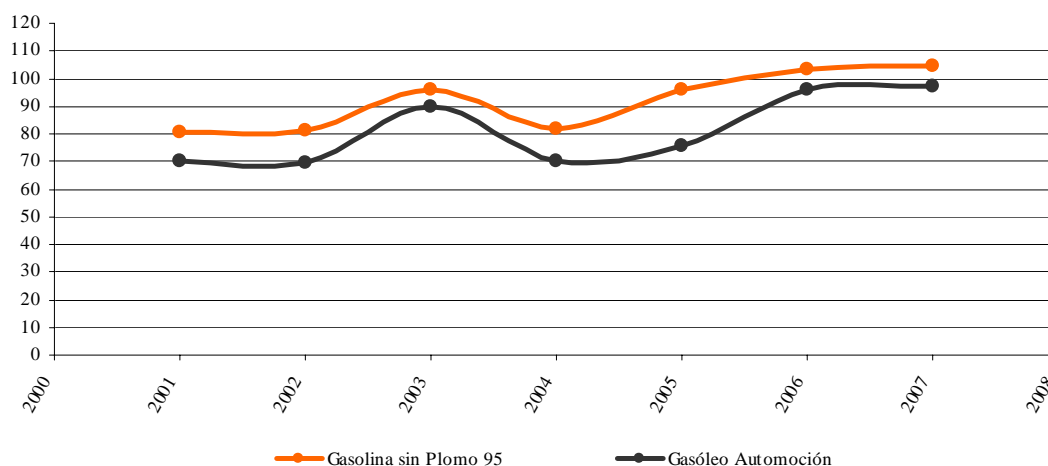


Figura 1. Evolución de los precios de los carburantes. Fuente: CORES (Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos): www.cores.es.

4.1 Planificación actual de las rutas de trabajo de la empresa

La planificación actual de las rutas de trabajo depende de unos factores muy importantes: localización del cliente, consumo mensual y tipo de máquina. Posteriormente, el operario realiza cambios en esta ruta basándose en unos criterios previstos y que dan lugar a la ruta replanificada: jornada laboral de los clientes, media mensual de consumo, ubicación de las máquinas y dimensión de la posición, ampliación del número de máquinas instaladas en un mismo cliente, modificación de la capacidad de la máquina, nueva línea de negocio de la empresa, periodo de caducidad de los productos, etc. Sin embargo, existen otros factores imprevistos que también podrían condicionar la ruta del operario y obligarle a modificar el itinerario de las visitas respecto a la ruta inicial y replanificada (Figura 2).

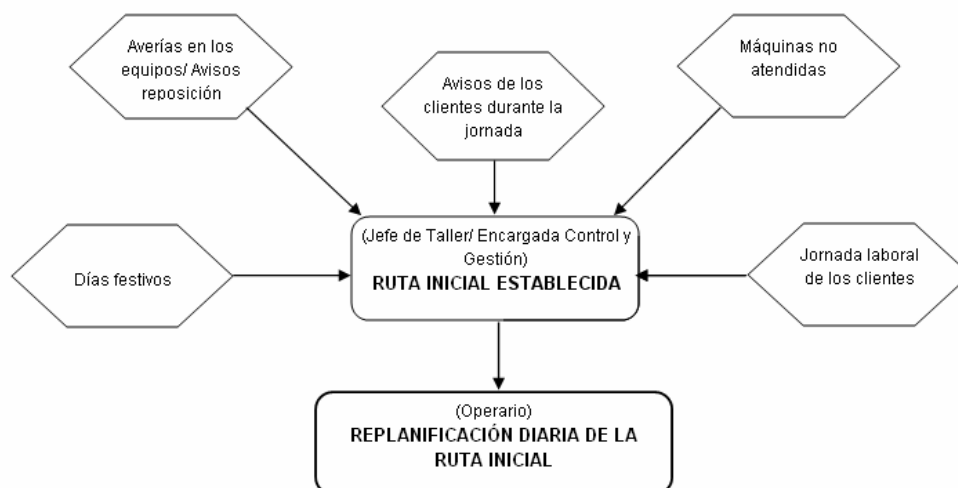


Figura 2. Replanificación de las rutas iniciales.

4.2 Propuesta de mejora

A partir de la herramienta *Rutas* se obtienen las matrices “Distancia” (km) y “Tiempo” (min). Estas facilitan la obtención de una tercera matriz “Costes” (€) que es función de las dos anteriores, mediante la siguiente fórmula:

$$f_{ij} = Km_{ij} \times Cu + t_{ij} \times Cm + CTributos \quad (1)$$

Como puede observarse, existe una parte fija y una variable. Esta última se expresa en función de los kilómetros y del tiempo, mientras que la fija se basa en un gasto que absorbe la empresa desde el momento en que el vehículo entra en funcionamiento. Por tanto los parámetros empleados son:

Km_{ij}: distancia en km del nodo *i* al nodo *j*.

Cu: se obtiene de la siguiente forma: en primer lugar se calcula los litros que consume el vehículo al recorrer un km (€/km) y, en segundo lugar, se calcula el precio medio del gasóleo durante el periodo estudiado.

t_{ij}: distancia en minutos del nodo *i* al nodo *j*.

Cm: para calcular este coste ha sido necesario conocer el total anual de horas trabajadas por el operario (horas ordinarias establecidas por el convenio, extraordinarias y festivas) y el salario bruto anual del trabajador. A partir de estos datos, se ha obtenido el coste por minuto del trabajador.

CTributos: el coste tributario diario hace referencia a los costes fijos que soporta la empresa (seguro del automóvil, impuesto de circulación, impuesto de la ITV) prorrateados.

En el modelo propuesto, la variable costes se formula como la suma de los costes de combustible, salariales y tributarios. Aunque estos son los componentes fundamentales de los costes directos de las empresas de transporte, el modelo se podría extender fácilmente introduciendo otras variables como son los gastos en neumáticos, mantenimiento, reparaciones y amortización y financiación de los vehículos.

El siguiente paso es evaluar y comparar el modelo actual con el propuesto (replanificado a partir de las matrices) siendo el modelo actual la ruta inicial y la ruta replanificada calculadas con los datos obtenidos de las matrices “Distancia” (km), “Costes” (€) y “Tiempo” (min). A partir de los datos obtenidos de la ruta inicial, se

construye en una hoja de cálculo tres matrices cuadradas para cada día de la semana, conteniendo los datos en km, min y € respectivamente. En estas matrices se incluyen todos los valores de todos los nodos que pertenecen a una misma jornada. Posteriormente, estas matrices se transforman en formato TXT para importarlas directamente a la aplicación *Grafos*. Una vez introducidas las matrices en la aplicación, se procede a hacer el análisis de rutas con el algoritmo para el problema del viajante a coste mínimo. De este modo, la aplicación proporciona una solución en el grafo y una ventana de análisis con la función objetivo obtenida, además de añadirse posteriormente la secuencia obtenida del análisis. A continuación, se muestran las Tablas 1, 2 y 3 que resumen, respectivamente, el ahorro mensual, anual, y extrapolado para todas las rutas de la empresa y para los tres parámetros analizados.

Km.	1ª Semana	2ª Semana	3ª Semana	4ª Semana	TOTAL
Ahorro Mensual					
Valores Máx s/ Valores Minimos	317 Km	276,5 Km	249,6 Km	280 Km	1.123,1 Km
R.Óptima s/ R.Inicial.	49,2 Km	27,9 Km	48,2 Km	27,9 Km	154,2 Km
Ahorro Anual	1ª Semanas	2ª Semanas	3ª Semanas	4ª Semanas	TOTAL
Valores Máx s/ Valores Minimos	3566 Km	3110,6 Km	2808 Km	3150 Km	12.634,6 Km
R.Óptima s/ R.Inicial.	1107 Km	627,75 Km	1107 Km	627,75 Km	1.734 Km
Ahorro Anual Extrapolado para las 7 Rutas					TOTAL
Valores Máx s/ Valores Minimos					88.442 Km
R.Óptima s/ R.Inicial.					12.138 Km

Tabla 1. Tabla resumen del ahorro en km.

Minutos.	1ª Semana	2ª Semana	3ª Semana	4ª Semana	TOTAL
Ahorro Mensual					
Valores Máx s/ Valores Minimos	749 min	1630 min	672 min	476 min	3527 min
R.Óptima s/ R.Inicial.	61 min	31 min	61 min	31 min	184 min
Ahorro Anual	1ª Semanas	2ª Semanas	3ª Semanas	4ª Semanas	TOTAL
Valores Máx s/ Valores Minimos	8426 min	18337 min	7560 min	5355 min	39678 min
R.Óptima s/ R.Inicial.	1370 min	706 min	1370 min	706 min	4152 min
Ahorro Anual Extrapolado para las 7 Rutas					TOTAL
Valores Máx s/ Valores Minimos					277.746 min
R.Óptima s/ R.Inicial.					29.064 min

Tabla 2. Tabla resumen del ahorro en minutos.

€.	1ª Semana	2ª Semana	3ª Semana	4ª Semana	TOTAL
Ahorro Mensual					
Valores Máx s/ Valores Minimos	69,45 €	57,60 €	61,00 €	48,00 €	236,05 €
R.Óptima s/ R.Inicial.	23,55 €	20,22 €	23,55 €	20,22 €	87,54 €
Ahorro Anual	1ª Semanas	2ª Semanas	3ª Semanas	4ª Semanas	TOTAL
Valores Máx s/ Valores Minimos	736,31 €	648,00 €	686,25 €	540,00 €	2.610,00 €
R.Óptima s/ R.Inicial.	529,87 €	454,95 €	529,87 €	545,95 €	984,82 €
Ahorro Anual Extrapolado para las 7 Rutas					TOTAL
Valores Máx s/ Valores Minimos					18.270,00 €
R.Óptima s/ R.Inicial.					6.893,74 €

Tabla 3. Tabla resumen del ahorro en euros.

Desde el punto de vista de los costes, *Grafos* proporciona un total de 16 valores mínimos. Esto significa que de las veinte jornadas diarias analizadas que componen cada mes estudiado (Semana 1-Lunes ó S1-L,... Semana 4-Viernes ó S4-V) la aplicación ha obtenido en dieciséis de éstas costes mínimos óptimos. Por tanto, el coste global de esta ruta disminuye dado que se repite la misma secuencia de visitas durante la primera y tercera semana, y durante la segunda y la cuarta semana para todos los meses analizados. Estos resultados comparados con el único valor mínimo que ha generado la ruta inicial confirman que las secuencias provistas por dicha aplicación ayudan a reducir el coste a la empresa. La diferencia entre los valores mínimos obtenidos frente a los máximos, suponen un ahorro anual total de 2.610 € para esta ruta. Al comparar la ruta inicial con la ruta óptima obtenida en *Grafos*, anualmente la empresa ahorraría la cantidad de 984,82 € para la ruta estudiada siempre y cuando se modificara la ruta inicial y la adaptara a los resultados obtenidos con la aplicación *Grafos*. Si se extrapolan los resultados para las siete rutas que actualmente tiene la empresa, la diferencia entre los valores mínimos y máximos supondría un coste máximo adicional de 18.270 € anuales para todas las rutas en el caso de que los operarios desviasen sus rutas para atender las incidencias, mientras que la cantidad que se ahorraría la empresa si modificase sus rutas iniciales y las adaptase a los resultados obtenidos con *Grafos* sería aproximadamente de 6.893,74 € anuales.

A continuación, se muestra un ejemplo para una de las jornadas estudiadas, concretamente la que representa los miércoles de la primera y tercera semana de cada mes (S1-3-X). En la Figura 3 se representa la ruta inicial planificada por la empresa y, en la Figura 4, la ruta óptima obtenida con *Grafos*.

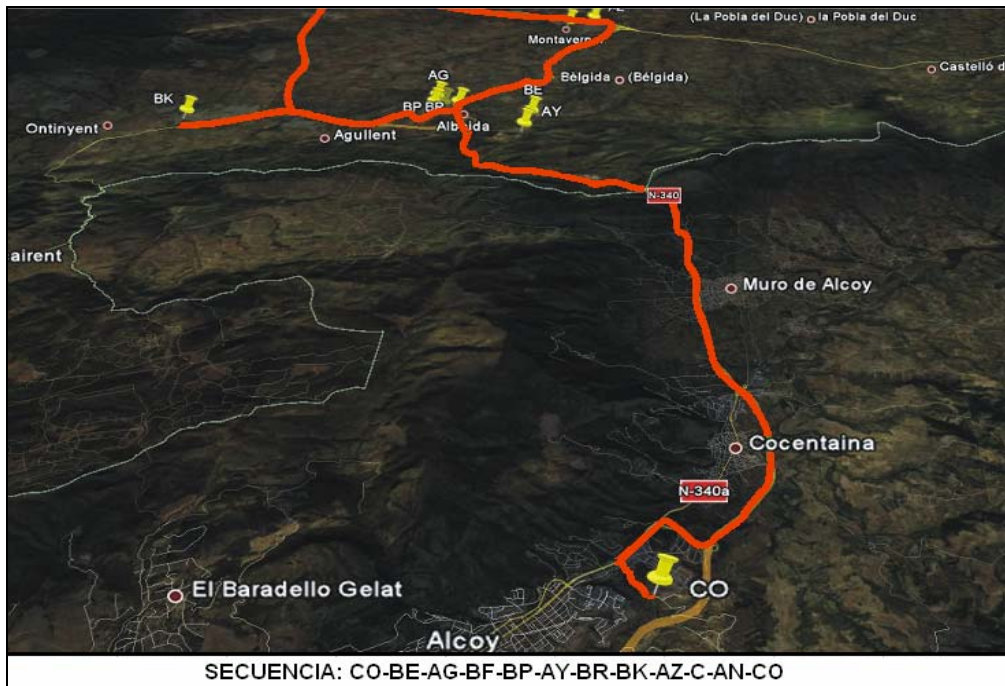


Figura 3. Representación de la ruta inicial planificada por la empresa para la jornada S1-3 X con Google Earth 2008.

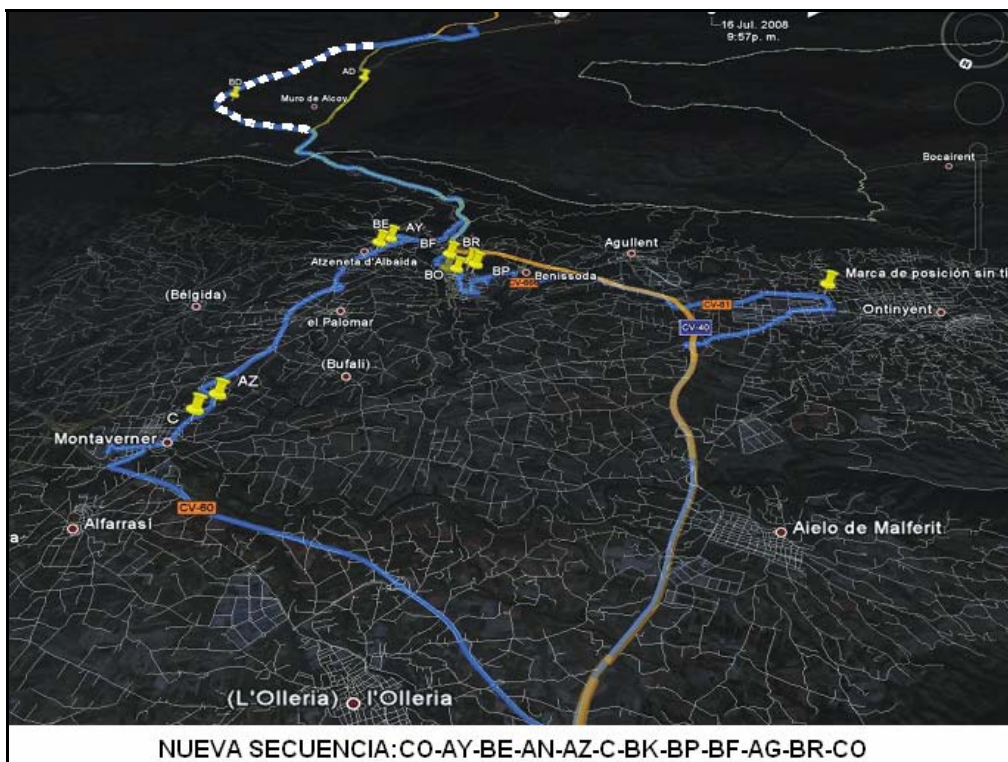


Figura 4. Representación de la ruta óptima obtenida para la jornada S1-3 X, software *Rutas*, Google Earth 2008.

Las figuras anteriores muestran dos rutas a simple vista similares, aunque al observar la secuencia se aprecia la diferencia. La Figura 3 muestra la ruta inicial fijada por la empresa y llevada a cabo por el operario durante la jornada escogida, los resultados obtenidos en el análisis fueron los siguientes: distancia de 87 km, tiempo de

desplazamiento efectivo estimado de 107 minutos y coste de la ruta de 23,2 € La Figura 4 muestra la secuencia obtenida para la misma jornada tras haber aplicado el algoritmo del Problema del Viajante. A continuación, se resumen los resultados obtenidos: distancia de 74,6 km, tiempo de desplazamiento efectivo estimado de 89 minutos y coste de la ruta de 17,63 € Una vez que se han estudiado todas las rutas, aunque se omitan por razones de espacio, se observa que siguiendo la misma ruta pero cambiando la secuencia de visitas a los clientes se consigue un ahorro en coste, tiempo y distancia recorrida.

5 Conclusiones

La aplicación *Grafos* ha optimizado la ruta inicial a través del cambio de la secuencia de visitas planteada en la ruta inicial, demostrando que puede mejorarse dicha ruta mediante el algoritmo del problema del viajante y utilizando los tres factores analizados en este trabajo (kilómetros, tiempo y coste en €).

Así ha podido demostrarse que la gestión de rutas es una de las áreas de gestión de la empresa que permite reducir costes si se optimizan eficazmente. Una de las utilidades de las diferencias entre los valores mínimos y máximos es que ayudan a entender el coste que supone desviarse de la ruta establecida para atender avisos, por ejemplo, de averías y reposiciones. Por tanto, comparando estos datos, se considera necesario replantear en un futuro qué le resultaría más rentable a la empresa: tener un operario que atienda las incidencias que surjan durante una jornada, desviándose de la ruta, o contratar un técnico para los avisos, evitando que el operario se desvíe de la ruta inicial planificada.

Aunque los resultados obtenidos con las rutas iniciales demuestran que la gestión de rutas de la empresa era efectiva, sería positivo que esta se plantease la posibilidad de reajustar las rutas iniciales en función de los resultados obtenidos con *Grafos* para optimizarlas, ya que el sistema propuesto facilitaría a la empresa poder planificar nuevas rutas o añadir nuevos clientes a las rutas existentes en la jornada más apropiada. También, es importante que la empresa controle los gastos y los reduzca en la medida de sus posibilidades, ya que como ocurre con el precio del gasóleo, hay variables que no pueden controlarse y que incrementan el gasto de la empresa, con lo que una buena política de gestión de rutas es el mejor aliado para frenar en parte estos gastos.

En cuanto a las líneas futuras de actuación, a corto plazo la empresa tiene previsto estudiar la viabilidad del sistema de gestión de rutas propuesto antes de adaptar o modificar su sistema actual de rutas. El objetivo fundamental tras implantar el método de optimización sería replantearse todas las rutas iniciales propuestas y modificarlas, siguiendo el patrón de secuencias obtenido mediante *Grafos* para cada una de las jornadas. Finalmente, sería interesante poder incorporar al estudio nuevas variables que influyan sobre las rutas óptimas obtenidas con *Grafos*. De este modo, podrían preverse qué va a ocurrir en un futuro bajo el supuesto de unas condiciones dadas, haciendo posible el estudio de diferentes resultados cambiando una o varias variables, con lo que se podría conocer con exactitud la ruta más adecuada.

Referencias bibliográficas

- Anderson, D.R., Sweeney, D.J., Williams, T.A. (2004): Métodos Cuantitativos para los Negocios. 8ª edición. Thomson International.
- Appel, K., Haken, W. (1977a): Every planar map is four colorable. Part I. Discharging. *Illinois Journal of Mathematics* 21, 429–490.
- Appel, K., Haken, W. (1977b): Every planar map is four colorable. Part II. Reducibility. *Illinois Journal of Mathematics* 21, 491–567.
- Bodin, L., Golden, B. (1981): Classification in vehicle-routing and scheduling. *Networks* 11 (2), 97–108.
- Desrochers, M., Lenstra, J.K., Savelsbergh, M.W.P. (1990): A classification scheme for vehicle-routing and scheduling problems. *European Journal of Operational Research* 46 (3) 322–332.
- Euler, L. (1736): Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis. *Commentarii Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae* 8, 128–140.
- Hierholzer, C. (1873): Über die Möglichkeit, einen Linienzug ohne Wiederholung und ohne Unterbrechnung zu umfahren. *Mathematische Annalen* 6, 30–32.
- Hillier, F.S., Lieberman, G.J. (2006): Introducción a la Investigación de Operaciones. 8ª edición. McGraw-Hill.
- Ministerio de Fomento (2001): Estudio socio-económico del sector del transporte por carretera. Consultrans.
- Rodríguez-Villalobos, A. (2008): Integración de un SIG con modelos de cálculo y optimización de rutas de vehículos CVRP y software de gestión de flotas. *Dirección y Organización* 35, 7–14.
- Sylvester, J.J. (1878): Chemistry and Algebra. *Nature* 17, 284.
- Taha, H.A. (2004): Investigación de Operaciones. 7ª edición. Prentice Hall, México.
- Winston, W.L. (2005): Investigación de Operaciones. Aplicaciones y Algoritmos. Ed. Thomson, México.