

Modelo de optimización de programación de rutas para una empresa logística peruana usando herramientas FSMVRPTW

RECIBIDO: 22/06/2016

ACEPTADO: 10/11/2016

NORMAN REYES MORALES*

RESUMEN

Las actividades de programación de rutas de transporte de empresas logísticas en el Perú son de especial relevancia dentro de los servicios que brindan. La empresa en la actualidad utiliza el ERP SAP Business One v9.1 como plataforma tecnológica de soporte a sus operaciones en especial a los procesos de la cadena de valor. Dentro de estos procesos se tiene el proceso de delivery el cual se encarga entre otras actividades de realizar la programación de rutas de transporte para las entregas de los pedidos de los clientes en todo el territorio nacional y en especial en Lima Metropolitana; en esta última que se tiene una alta complejidad para la atención de los pedidos por las diversas restricciones a cumplir y por no contar con una herramienta adecuada dejando dicha actividad a la decisión del programador de rutas según su experiencia. Con herramientas como FSMVRPTW (Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows) se logró encontrar ahorros significativos empleando una base de conocimientos, herramientas informáticas y de investigación de operaciones.

Palabras clave: FSMVRPTW, delivery, optimización

ROUTING PROGRAMMING OPTIMIZATION MODEL FOR A PERUVIAN LOGISTICS COMPANY USING TOOLS FSMVRPTW

ABSTRACT

Activities transport routes logistics companies in Peru are of special relevance in the services they provide. The company currently uses the SAP Business One ERP technology platform v9.1 and support their operations especially the processes of the value chain. Within these processes is the process of delivery which is responsible among other activities to perform scheduling transport routes for deliveries of customer orders throughout the country and especially in Metropolitan Lima; in the latter which has a high complexity attention to orders by the various restrictions to comply and not have a proper tool such activity leaving the decision Programmer routes according to their experience. With tools like FSMVRPTW (Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows) it was possible to find significant savings using a knowledge base, tools and operations research

Keywords: FSMVRPTW, delivery; optimization.

1. INTRODUCCIÓN

Una empresa dedicada a los servicios logísticos (Third Party Logistics (3PL)) tiene los siguientes procesos claves de negocios: Plan, Source, Make, Delivery y Return establecidos en The Supply Chain Operations Reference modeling - SCOR desarrollado por the supply chain council (<http://www.supply-chain.org>).

Definición del problema de investigación

En el proceso de Delivery o Distribución se tiene una actividad importante que es la Programación de Rutas de Transporte, la cual es bastante compleja y la empresa investigada tiene un software que utiliza el método de las distancias más cortas para la asignación de rutas y lo muestra en el plano de Lima Metropolitana para ubicarlos geográficamente. Los parámetros de entrada son las rutas necesarias (unidades de transporte disponible) y las direcciones de los clientes a atender ubicados en el plano de Lima (nodos); se ejecuta el programa y este agrupa los puntos de visita (clientes) en grupos por rutas mediante la asignación de las distancias más cortas. Esta corrida inicial NO considera el peso y volumen de la carga a transportar, peso y volumen máximo según la capacidad del vehículo, costo por tipo de transporte, tiempos de traslados, tiempo de servicio, ventanas horarias de atención de los clientes y velocidad promedio por ruta entre otras, que son necesarias para evaluar una adecuada programación de rutas considerando diversos objetivos como la minimización del costo fijo, la maximización del uso de la carga contratada y la maximización del número de entregas de pedidos, siendo esta última, una variable importante en el nivel de servicio a los clientes.

Objetivo de la investigación

El objetivo de esta investigación es la de incorporar las variables como peso y volumen de la carga a transportar, el número y la capacidad medida en peso y volumen máximo que puede transportar un vehículo, el costo de servicio de transporte por tipo de vehículo, los tiempos de servicio y las ventanas horarias que atienden los clientes, la velocidad promedio y otras, así mismo cumplir con objetivos en conflicto como la minimización del costo fijo, la maximización del uso de la carga contratada y la maximización del número de entregas de órdenes de venta,

* Docente de la Pontificia Universidad Católica del Perú y la Universidad Antonio Ruiz de Montoya. E-mail: reyes.ne@puccp.pe; norman.reyes@uarm.pe

en un modelo que sea técnica y económicamente viable para su aplicación a su realidad aunque no necesariamente incorpore todas las mencionadas dentro de un escenario de variabilidad de la demanda con comportamientos aleatorios o cíclicos. Una de las restricciones de este modelo es que muchas de estas variables no son estáticas sino dinámicas como los tiempos de traslado debido al tránsito de Lima, igualmente las unidades al ser tercerizadas, tienen restricciones de disponibilidad según su capacidad por situaciones de mercado.

Teóricamente existen modelos que resuelven parcialmente este problema y los más conocidos son:

- 1) El problema del Agente viajero o **TSP** (Travelling Salesman Problem) el cual dispone de un solo vehículo que debe visitar a todos los clientes en una sola ruta y a costo mínimo. No suele haber un depósito o almacén (y si lo hubiera no se distingue de los clientes), no hay demanda asociada a los clientes y tampoco hay restricciones de tiempo; la formulación de la solución a este problema fue realizada por Dantzig, Fulkerson y Johnson (1954). Este es un modelo muy sencillo basado en distancias entre nodos conformando una ruta. El desarrollo del modelo se realiza con programación lineal formulada por Dantzig (1951).
- 2) El **VRP** (Vehicle Routing Problem) es un problema de optimización combinatoria y programación entera, y es una evolución del modelo TSP en la cual cada cliente, incluido el depósito, tiene asociada una demanda y cada vehículo tiene una capacidad de carga límite (se considera que la flota es homogénea en capacidad). En este problema la cantidad de rutas no es fijada de antemano como en el TSP y la formulación del problema es realizada por uno de los algoritmos más difundidos para el VRP, es el Algoritmo de Ahorros de Clarke y Wright (1964). Si en una solución de dos rutas diferentes [(0, i) y (0, j)] pueden ser combinadas formando una nueva ruta (0, i, j, 0), el ahorro (en distancia) obtenido por dicha unión es mayor a la inicial, se agrega a la solución el nuevo arco (i, j). En este algoritmo se parte de una solución inicial y se realizan las uniones que den mayores ahorros siempre que no violen las restricciones del problema.
- 3) El **FSMVRPTW** (Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows) o Problema de ruteo de una flota de vehículos heterogéneo en capacidad y cantidad para atender clientes en ventanas horarias, es un modelo metaheurístico de inserción constructiva de programación

entera que permite determinar al mismo tiempo, la composición y las rutas asignadas a una flota de vehículos heterogéneos destinados a servir a un conjunto dado de clientes dentro de las ventanas horarias establecidas. El problema del enrutamiento nos obliga a diseñar un conjunto de rutas de costo mínimo que originan y terminan en un depósito central y que atienden a clientes con demandas conocidas, dentro de ciertas ventanas de tiempo.

También existen otras metaheurísticas como FSMVRP (Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem) aplicadas con diferentes técnicas como algoritmos genéticos (Brito et.al. 2015), búsqueda tabú y colonia de hormigas (Olivera 2004) aplicadas a diversos ámbitos y temas de optimización (Távora 2014).

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El almacén desde donde parten las unidades se encuentran en el distrito de Lurín, al sur de Lima; las posiciones de clientes se han considerado en Latitud y Longitud conformando los nodos. En el modelo se denominan Clientes y se denotan $N = \{0, 1, \dots, n\}$ donde 0 es el depósito y se configura el arco $A = \{(i, j) : i, j \in N\}$. Para cada arco $(i, j) \in A$, denotamos a D_{ij} a la distancia recorrida por el arco desde i a j ; para cada cliente se determina una demanda en toneladas q_i (el depósito tiene demanda = 0) un tiempo de servicio S_i para cargar y descargar la demanda q_i y la ventana $[a_i, b_i]$, una solución factible del servicio es que el vehículo arribe en el momento $t \in [a_i, b_i]$, o que llegue en el instante $t < a_i$ y que espere en $a_i - t$ unidades de tiempo antes de iniciar el servicio. Para esta investigación se asume que todas las ventanas horarias inician a las 8 hrs y terminan a las 18 hrs.

Los vehículos están compuesto por H tipos diferentes de vehículos. Cada tipo de vehículo h ($h=1, \dots, H$) tiene una capacidad Q_h y un Costo Fijo F_h y se asume como una capacidad infinita de atención. El costo fijo de los vehículos depende del tipo, capacidad y recorridos a precios de mercado. La velocidad de recorrido, los tiempos de carga y descarga, los tiempos de servicio son constantes.

Se tienen las siguientes reglas:

1. Cada ruta, inicia y termina en el depósito.
2. Cada ruta es asignada a un vehículo.
3. La demanda total de los clientes de cada ruta no debe exceder a la capacidad del vehículo asignado a dicha ruta.

4. Cada cliente es visitado por única vez y el servicio se inicia dentro de su ventana horaria.

3. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO FSMVRPTW

La formulación matemática para el modelo FSMVRPTW es la siguiente:

Se define K tipos de vehículos distintos obtenido por n vehículos del tipo h para cada $h \in H$. Para cada $k \in K$, tenemos Q^k y F^k que representan la capacidad y el costo del vehículo k respectivamente. La fórmula es una particularidad de la formulación VRP y la formulación matemática de FSMVRPTW, se ha tomado de Dell'Amico et al. Por lo tanto, parte del problema de rutas se configura con dos variables:

(i) Variable x_{ij}^k que toma el valor de 1 si el arco (i, j) es atendido por el vehículo k;

(ii) Variable y_i^k que toma el valor de 1 si el cliente es atendido por el vehículo k.

En el orden en que se seleccionan a los vehículos se introduce una variable binaria z^k , que toma el valor de 1 si el vehículo de $k \in K$ es usado o de lo contrario tomara el valor de 0. Para la administración del tiempo en las ventanas horarias y la duración de las rutas se configuran las siguientes variables:

(iii) Variable t_i^k que es el mínimo tiempo en que el vehículo k puede llegar a cada nodo $i \in V$;

(iv) Variable τ^i que indica el mínimo instante de tiempo en que el servicio del cliente puede iniciar;

(v) Variable π^k que indica el instante en que el vehículo k es usado para iniciar la ruta. Observar que para cada vehículo k, el tiempo de inicio y fin de la ruta coinciden con las variables π^k y t^k_0 .

El uso de estas variables y la constante grande y positiva M (la que puede configurarse como el $\max_{i \in N} [b_i + s_i] + \max_{(i,j) \in A} d_{ij}$), el problema de FSMVRPTW puede ser formulado como:

$$\text{Min } \sum_{k \in K} (F^k z^k + t^k_0 - \pi^k) - \sum_{i \in N} s_i \quad (1)$$

Con las siguientes restricciones:

$$\sum_{k \in K} y_i^k = 1, \quad i \in N \quad (2)$$

$$y_i^k = \sum_{j \in V: (i,j) \in A} x_{ij}^k, \quad i \in N, k \in K \quad (3)$$

$$y_i^k = \sum_{j \in V: (j,i) \in A} x_{ji}^k, \quad i \in N, k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i \in V} q^i y_i^k \leq Q^k z^k, \quad k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{j \in S} x_{ij}^k \geq y_i^k, \quad s \subseteq N, i \in S, k \in K \quad (6)$$

$$t_j^k \geq \tau_i + s_i + d_{ij} - M(1 - x_{ij}^k), \quad (j, i) \in A: i \in N, k \in K, \quad (7)$$

$$t_j^k \geq \pi^k + d_{0j} - M(1 - x_{0j}^k), \quad j \in N, k \in K, \quad (8)$$

$$t^k_0 \geq \pi^k, \quad k \in K, \quad (9)$$

$$\tau_i \geq t^k, \quad i \in N, k \in K \quad (10)$$

$$a_i \leq \tau_i \leq b_i, \quad i \in N \quad (11)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, \quad (i, j) \in A, k \in K, \quad (12)$$

$$y_i^k \in \{0, 1\}, \quad i \in N, k \in K, \quad (13)$$

$$z^k \in \{0, 1\}, \quad k \in K, \quad (14)$$

$$t_i^k \geq 0, \quad i \in N \quad (15)$$

$$\tau_i \geq 0, \quad i \in N \quad (16)$$

$$\pi^k \geq 0 \quad k \in K, \quad (17)$$

La restricción (2) propone que cada cliente debe ser visitado por un vehículo exclusivamente, además las restricciones (3) y (4) proponen que si el vehículo k visita al cliente i, este debe entrar y salir de dicho nodo. Las inecuaciones (5) del estado de la capacidad, restringe a cada vehículo utilizado de $k \in K$, y la inecuación (6) le da requerimiento de conectividad a cada ruta. Las restricciones (7), (10) y (11) definen el instante del tiempo para el servicio de cada cliente i e impone las restricciones de cada ventana de tiempo. Por otro lado, la restricción (8) define el instante de tiempo en que el vehículo k $\in K$ inicia esta ruta. Nota, cuando un vehículo k no es utilizado π^k y t^k_0 no son restricciones, pero (9) el estado $t^k_0 - \pi^k \geq 0$, y la función objetivo le asignarán valores comunes para una solución óptima.

La cantidad de variables y restricciones hacen un modelo complejo y se tomaron pocos nodos para esta investigación, sin embargo en la realidad se requieren 50 a 100 nodos lo que necesitaría tener una licencia de LINGO con un número infinito de variables.

4. DESARROLLO DEL MODELO

Este es un piloto para probar el modelo, en principio se consideran 7 nodos con el objetivo de probar el modelo y su desempeño en LINGO 11 (Cornejo 2014). Luego se extenderá a 50 nodos.

A. Datos, figuras y tablas

A continuación se describen los datos utilizados.

En la tabla 1, se listan los nodos con las direcciones de los clientes y los distritos de Lima Metropolitana a los que pertenecen, las demandas en volumen (m³) y peso TM correspondiente a la mercadería a transportar por cada orden de venta de dicho cliente (información obligatoria en el ERP SAP Business One), con las ubicaciones de latitud y longitud obtenidas de Google Maps (<https://www.google.com.pe/maps>) para cada dirección de clientes.

En la Tabla 2 se tienen las distancias calculadas mediante la fórmula de Haversine¹ con los datos de latitud y longitud de cada nodo para construir la matriz simétrica de distancias en Km. En la matriz, la enumeración de los nodos inician en 0 (asignado

Tabla 1. Nodos, direcciones, posiciones y demandas

Nodo	Dirección	Distrito	Vol		Latitud	Longitud
			M3	TM		
1	0 Prolongación Los Eucaliptos Lote 1B	LURIN			-12,2518279	-76,8910264
2	1 Jr. Azangaro 764-770	LIMA	0,06	1,8	-12,052571	-77,031612
3	2 Av. Mercaderes 323	SURCO	0,08	1,3	-12,130904	-76,983354
4	3 Av. Petit Thouars 2352	LINCE	0,12	2,4	-12,087363	-77,03295
5	4 Av. Aviación 2691	SAN BORJA	0,32	1,08	-12,09376	-77,002608
6	5 Av Prolongación Huamanga 773	LA VICTORIA	0,14	0,48	-12,067023	-77,019817
7	6 Prolongación Andahuaylas 735	LA VICTORIA	2,02	1,44	-12,067317	-77,02568
			2,74	8,5		

Fuente: Elaboración propia

Las latitudes y longitudes se han obtenido de Google Maps en <https://www.google.com.pe/maps>

¹ Haversine formula:

$$a = \sin^2(\Delta\phi/2) + \cos \phi_1 \cdot \cos \phi_2 \cdot \sin^2(\Delta\lambda/2)$$

$$c = 2 \cdot \text{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a})$$

$$d = R \cdot c$$

al almacén) y hasta el 6 que son las direcciones de los clientes a entregar la mercadería.

En la Tabla 3, se listan los valores de otros parámetros considerados en la investigación, según precios de mercado y mediciones de la empresa.

Para el caso de vehículos se consideran Furgones de Tolva Cerrada a combustible Diesel o GNV, las capacidades en M3 son referenciales según los vehículos que se contratan en la empresa, las tarifas de servicios de transporte son a precios de mercado e incluyen el costo de chofer, ayudante, combustible y alquiler del vehículo por viaje (consideran la partida y el retorno al almacén), excepto peajes. Un parámetro a considerar pero no se ha incluido en el modelo, es un objetivo de capacidad contratada mínima del 80%.

Las ventanas horarias para esta muestra se han considerado iguales en horario de atención de oficina desde las 0800 horas hasta las 1800 horas, y otro parámetro a considerar es la maximización de las entregas que se han fijado en 95% por cada viaje. Así mismo se han establecido velocidades promedios constantes a los vehículos por circular en la metrópoli de Lima.

Tabla 2. Matriz simétrica de las distancias

	0	1	2	3	4	5	6
0	9999	26,9231	16,7826	23,932	21,3608	24,8719	25,2097
1	26,9231	9999	10,1714	3,8725	5,5624	2,056	1,7625
2	16,7826	10,1714	9999	7,2488	4,6317	8,137	8,4386
3	23,932	3,8725	7,2488	9999	3,3758	2,6755	2,3657
4	21,3608	5,5624	4,6317	3,3758	9999	3,5138	3,8662
5	24,8719	2,056	8,137	2,6755	3,5138	9999	0,6385
6	25,2097	1,7625	8,4386	2,3657	3,8662	0,6385	9999

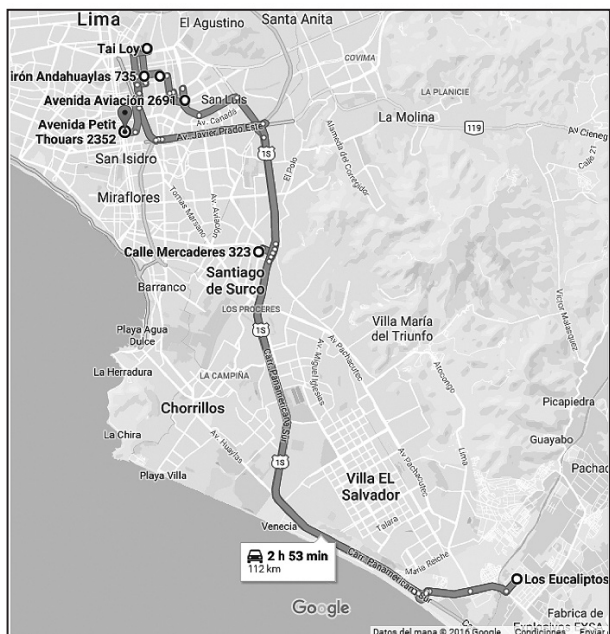
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Otros parámetros

Capacidad (3 vehiculos) TM	3	6	10			
Capacidad (3 vehiculos) en M3	20	30	30			
Costo Fijo (\$/. x viaje)	420	500	720			
Velocidad Promedio (km/hora)	40	40	40			
Inicio de ventana horaria (horas)	0	8	8	8	8	8
Termino de ventana horaria (horas)	0	18	18	18	18	18
Tiempo de servicio en el cliente (horas)	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. Nodos en el mapa de Lima Metropolitana



Fuente: Elaboración propia.

El mapa Lima Metropolitana se ha obtenido de Google Maps en <https://www.google.com.pe/maps>

En la Figura 1 se muestran los nodos de la Tabla 1, ubicados en el mapa de Lima Metropolitana con su latitud y longitud.

B. Ejecución del modelo matemático FSMVRPTW

Se desarrolló el modelo matemático de programación lineal entera en el software Lingo 11 y se corrió en una computadora Core i5 de 6 Mb de memoria Ram y 2.67 Ghz. El tiempo de proceso fue de 22 segundos y se utilizaron 171 variables enteras, 403 restricciones, 300 772 iteraciones, dando como resultado:

Ruta: 1 – 3 – 5 – 6 – 2 – 7 – 4 - 1 con vehículo 3 (10 Tm) para una demanda total de 8.5 Tm con una tasa de utilización del 85%.

C. Resultado del modelo semi manual

El modelo semi manual dio como resultado las siguientes rutas

Ruta 1: 1 – 5 – 6 – 7 – 1 con vehículo 1 (3 Tm) y con una demanda de 3 Tm y una tasa de utilización del 100%

Ruta 2: 1 – 3 – 2 – 4 – 1 con vehículo 2 (6 Tm) y con una demanda de 5.5 Tm y una utilización de 92 %

Los costos por el pago de fletes de las 2 alternativas se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados comparados

Vehículos de capacidades TM	3	6	10	Total
Metodo antiguo	420	500		920
Nuevo Metodo			720	720
Diferencia				200

Fuente: Elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

1. El tiempo de procesamiento con la variable de demanda de peso TM en este caso era relevante y considerando los vehículos disponibles se estimó una programación de ruta optima con 1 vehículo de 10 Tm en comparación con el método actual (semi manual) donde se asignaron los vehículos de 3 Tm y 6 Tm, dando un ahorro de S/ 200 por viaje (ver Tabla 4). Respecto al método actual, se tuvo una tasa de utilización del 94% al contratar los dos vehículos, siendo ésta variable la que prevaleció en la decisión de asignación del programador de rutas.
2. Diariamente en la empresa se generan entre 6 a 8 programaciones de rutas diferentes por cada cliente y considerando el tiempo de programación de ruta actual de unos 15 a 30 minutos frente al propuesto de 0.5 minutos, se tiene un importante ahorro en tiempo de actividad. Considerar también que los tiempos varían según el número de puntos a reparto que van de 7 a 50 puntos por corte o corrida lo que significa que a mayor número de puntos, el nuevo método se vuelve más eficiente y confiable en comparación con el método actual (semi manual).
3. En la realidad las demandas por cliente son aleatorias y pueden variar en peso y volumen, por lo que la restricción de capacidad deben medir ambos parámetros, también se deben agregar los objetivos de maximizar la capacidad contratada de vehículos en las restricciones. Las ventanas horarias de los clientes son aleatorias y los tiempos de traslado y atención, cambian permanentemente y habrá que hacer mediciones permanentes. Esto representa una oportunidad de investigación futura.
4. El avance de la tecnología informática como las herramientas de Google Maps, la toma de

datos en Excel y la interfase automática con Lingo, presenta una alternativa interesante y viable no solo en la programación de rutas sino en la operatividad del transporte al poderles remitir información a los choferes. Por otro lado la medición permanente y el almacenamiento de dichos datos, es un activo importante que unido a herramientas de inteligencia artificial brindan un gran potencial de optimización de servicio.

Agradecimientos

A los Magister e Ingenieros Industriales Wilmer Atoche y Christian Cornejo, y al Bachiller en Ingeniería Industrial Juan Nolasco por el apoyo brindado en la elaboración de esta investigación.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Brito, J., Martínez, F. J., Moreno, J. A., & Verdegay, J. L. (2015). An ACO hybrid metaheuristic for close–open vehicle routing problems with time windows and fuzzy constraints. *Applied Soft Computing*, 32, 154-163.
- [2] Clarke, G. U., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations research*, 12(4), 568-581.
- [3] Cornejo C. (2014). *Laboratorio de investigación operativa I*. Lima: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú
- [4] Dantzig, G. B. (1951). Application of the simplex method to a transportation problem. *Activity analysis of production and allocation*, 13, 359-373.
- [5] Dantzig, G., Fulkerson, R., & Johnson, S. (1954). Solution of a large-scale traveling-salesman problem. *Journal of the operations research society of America*, 2(4), 393-410.
- [6] Dell'Amico, M. y Vigo, D. (2007). Heuristic Approaches for the fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows. Recuperado el 01/07/2016 desde <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/trsc.1070.0190>
- [7] Olivera, A. (2004). *Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos*. Recuperado el 01/07/2016 desde <https://www.colibri.udelar.edu.uy/handle/123456789/3508>
- [8] Távora, J. y Muñuzuri, J. (2014). *Modelo de rutas de vehículos aplicados al e-commerce*. Recuperado el 01/07/2016 desde <http://0-bibing.us.es.fama.us.es/proyectos/abreproy/90031/fichero/TFG.pdf>