

# **Modelo de distribución urbana de mercancías en empresa dedicada al transporte de carga**

**Javier Arias-Osorio**

Escuela de estudios industriales y empresariales  
Universidad Industrial de Santander  
Bucaramanga, Colombia  
[jearias@uis.edu.co](mailto:jearias@uis.edu.co)

**Chabeli Suarez**

Escuela de estudios industriales y empresariales  
Universidad Industrial de Santander  
Bucaramanga, Colombia  
[chabelisuarezm@gmail.com](mailto:chabelisuarezm@gmail.com)

## **Abstract**

Las empresas dedicadas al transporte de carga son agentes movilizadores de mercancías desde un generador de carga hasta un punto de demanda de esa misma. En este trabajo se plantea un modelo de distribución que considera la programación de la carga a recoger y la forma de entregar en dichos puntos de demanda para una empresa dedicada al transporte de carga seca, al granel, refrigerada y congelada. Un modelo de ruteo con ventanas de tiempo (VRPTW por su sigla en inglés) es considerado para el diseño de las rutas entre origen y destino, y la técnica de optimización de colonia de abejas (ABC, por su sigla en inglés) escogida para dar solución al modelo. Los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios para la compañía considerando como indicadores de medición, el balance entre las rutas en cuanto a rentabilidad y la mejora en la entrega oportuna a los puntos de demanda, lo que genera una reducción considerable del número de devoluciones.

## **Keywords**

Distribución urbana, transporte de mercancías, modelo de optimización, diseño de rutas, VRPTW.

## **1. Características de la operación**

El presente trabajo se realiza para una empresa de transporte de carga encargada de la distribución urbana en Bucaramanga, Colombia del 95% del producto terminado de uno de sus clientes. Parte de la operación se concentra en transportar el producto terminado en vehículos refrigerados, desde el centro de distribución de la empresa contratante hasta los puntos de demanda (clientes de la empresa contratante).

Los vehículos de la empresa transportadora tienen diferentes propietarios que hacen parte de la empresa y quienes deciden realizar los trabajos de transportes definiendo la ruta y el conductor. A partir de esto es que se considera importante balancear las rutas en cuanto a rentabilidad. Además, en cuanto a este criterio:

Diariamente son programadas 18 rutas urbanas teniendo en cuenta en primer lugar las siguientes restricciones: Restricción de pico y placa en las zonas urbanas, cada vehículo debe realizar por lo menos 1 ruta viajera cada semana.

La asignación de las rutas a cada vehículo se hace teniendo en cuenta las siguientes restricciones: La capacidad de transporte en toneladas de cada vehículo (2.5 o 1.5 toneladas), debe haber una equidad en la

asignación de kilogramos a transportar, es decir, a los vehículos que hoy se les asigne rutas con demandas mayores o iguales a 1.5 toneladas el día de mañana se le debe asignar una ruta con una demanda menor. Los vehículos no deben repetir ruta durante el mes con la finalidad de que la operación se desarrolle en las mismas condiciones para todos, entre otras.

Cada ruta programada comienza con una actividad de cargue y está asociada a un sector ya predefinido en una segmentación geográfica.

## **2. Ruteo de Vehículos**

La red que se utiliza para la distribución urbana de mercancías generalmente es una red terrestre. La red se describe en su mayoría de las veces como un grafo, donde los arcos representan los segmentos o secciones de las vías, y los vértices corresponden a las uniones de los nodos de la red. Para este caso en particular, el depósito y los clientes están situados en los nodos. Los arcos pueden ser dirigidos y no dirigidos, dependiendo de si se permite la circulación en un único sentido o ambos (por ejemplo, calles con ambos sentidos de circulación o una única dirección), cada arco tendrá un peso, que en este caso es el tiempo de viaje, el cual depende de la distancia recorrida, la velocidad del vehículo y del momento en que se recorra el arco (condiciones de tráfico).

La mayoría de los problemas que se abordan en la literatura son de tipo simétrico, con el objetivo de simplificar el modelo matemático, sin embargo, estos modelos no representan la realidad adecuadamente. Para este problema se construye la red teniendo en cuenta las direcciones de las vías, por lo tanto, se considera un problema asimétrico.

Para la construcción de la red de distribución se usa la API de Google Maps que permite realizar las siguientes funciones:

- Geo-localización de los clientes y depósito
- Análisis de la red de transporte, red de carreteras, sentido de circulación de las vías.
- Representación geográfica de la solución (rutas para cada vehículo)

Las solicitudes de información necesaria se hacen a los servicios de Google Maps por medio de módulos de código que proporcionen acceso a diferentes herramientas como lo son:

*Matriz de Distancias:* Es un servicio que proporciona las distancias y tiempos de viaje tomando como referencia la matriz de origen-destino. Teniendo en cuenta el modelo de transporte y sentido de circulación de las vías, basándose en la red de carreteras actual.

*Geo-codificación de Google Maps:* Este servicio está diseñado para convertir direcciones (calle, carrera) en coordenadas geográficas (latitud, longitud), que a su vez se pueden convertir en marcadores en el mapa de referencia. Las direcciones que se desea geo-codificar deben estar en el formato utilizado por el servicio portal nacional del país.

## **3. Modelo de optimización**

La componente geográfica de los problemas se modela a través de un grafo conexo ( $G = N, A$ ). El conjunto de nodos  $N = \{0, 1, \dots, n\}$  representa los sitios que participan en el problema, es decir, clientes y depósitos. El nodo 0 representa un depósito y los nodos  $\{1, \dots, n\}$  representan los clientes. Cada cliente  $i$  tiene asociada una demanda  $d_i > 0$ . Se dispone de una flota de vehículos  $K$  idénticos, cada uno de los cuales tiene capacidad  $C > 0$ . La existencia de un arco  $(i, j) \in A$  indica que es posible el recorrido del nodo  $i$  al

nodo  $j$ . Es usual que a cada arco  $(i, j) \in A$  se le asocie un tiempo de viaje  $t_{ij}$ . La variable binaria  $X_{ijk}$  indica si la ruta  $k$  cubrirá el arco que va desde  $i$  hasta  $j$ .

Para introducir el modelo VRPTW de una manera ordenada y sencilla, a continuación, se detallan los parámetros, los conjuntos y las variables que lo integran.

### Índices

Los índices del modelo propuesto so:

$i$  = Nodo de partida  $i(1, 2, \dots, n)$

$j$  = Nodo de llegada  $j(1, 2, \dots, n)$

$n$  = Nodos totales

$k$  = Vehículo  $k(1, 2, \dots, k)$

### VARIABLES DE DECISIÓN

$X_{ijk} \begin{cases} 1. \text{ Si el vehículo viaja de } i \text{ a } j \\ 0. \text{ De lo contrario} \end{cases}$

$Y_{ijk} \begin{cases} 1. \text{ Si cliente } i \text{ es visitado por el vehículo } k \\ 0. \text{ De lo contrario} \end{cases}$

### Parámetros

$T_{ijk}$  Tiempo de viaje entre los nodos  $(i, j)$  por el vehículo  $k$

$C$  Capacidad del vehículo

$d_i$  Demanda del cliente  $i$

La solución consiste en minimizar la función objetivo ( $f$ )

$$1. f = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^k T_{ijk} * X_{ijk} \rightarrow \min$$

$$2. f = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^k T_{ijk} * X_{ijk} + \sigma * \sum_{k=1}^k [\sum_{i=0}^n d_i Y_{ik} - C, 0 \rightarrow \min$$

La función (1) tiene como propósito disminuir el tiempo total de transporte en los que se incurre al servir un número  $n$  de clientes, con el objetivo de encontrar la solución óptima al problema, mientras que la función de evaluación (2) está diseñada para calcular el valor del fitness de cada sub-ruta.

$\sigma$ : Es un parámetro positivo autoajutable, el cual se divide en 0,1 si la demanda de los clientes es mayor a la capacidad del vehículo, de lo contrario se multiplica por 0.1

$$\text{SI} \quad \begin{cases} \text{Demanda acumulada} > \text{capacidad del vehiculo} & \frac{\sigma}{0.1} \\ \text{Demanda acumulada} \leq \text{capacidad del vehiculo} & \sigma * 0.1 \end{cases}$$

Además, se deben cumplir las siguientes restricciones:

3.  $\sum_{i=0}^n d_i Y_{ik} \leq C \rightarrow \forall k$
4.  $\sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n X_{ijk} = 1, j = 1, 2, 3, \dots, n$
5.  $\sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^n X_{ijk} = 1, i = 1, 2, 3, \dots, n$
6.  $\sum_{i=0}^n X_{itk} - \sum_{j=0}^n X_{tjk} = 0, \forall k, t = 1, 2, 3, \dots, n$
7.  $\sum_{j=1}^n X_{0jk} \leq 1, k = 1, 2, 3, \dots, K$
8.  $\sum_{i=1}^n X_{i0k} \leq 1, k = 1, 2, 3, \dots, K$
9.  $X_{ijk} = 0 \text{ or } 1, \forall i, j, k$
10.  $Y_{ik} = 0 \text{ or } 1, \forall i, k$

La restricción (3) describe que la demanda acumulativa de los clientes en una ruta no puede exceder el máximo de capacidad del vehículo, la (4) y (5) asegura que cada cliente es servido una sola vez. La restricción (6) verifica la continuidad de la ruta, la (7) y (8) indican que el vehículo no puede ser usado más de una vez, finalmente las restricciones (9) y (10) están asociadas a las variables de decisión.

#### **4. Técnica de solución**

El algoritmo de colonia de abejas (ABC) es un algoritmo bio-inspirado de inteligencia de enjambres propuesto y desarrollado por Dervis Karaboga en 2005<sup>1</sup>, en este algoritmo se busca emular el comportamiento de las abejas en la búsqueda y explotación de las fuentes de alimento, para ello se define una colmena artificial formada por una zona de comunicación, denominada zona de baile, y tres tipos de abejas: obreras, observadoras y exploradoras.

En el ABC, las abejas se mueven en un espacio de búsqueda multidimensional eligiendo fuentes de néctar dependiendo de su experiencia pasada y la de sus compañeros de colmena o ajustando su posición. Algunas abejas (exploradoras) vuelan y eligen las fuentes de néctar mayor, memorizan su posición y olvidan la anterior. De este modo, el ABC combina métodos de búsqueda local y búsqueda global, intentando equilibrar el proceso de la exploración del espacio de búsqueda.

El algoritmo define los siguientes elementos mínimos:

*Fuentes de alimento:* son el objetivo esencial del problema ya que se busca encontrar las mejores fuentes, las cuales se valoran por simplicidad con un número que indica la cantidad de la fuente de acuerdo a las características que presenta, como la cercanía a la colmena, y la cantidad y facilidad para extraer el néctar.

---

<sup>1</sup> KARABOGA, Dervis. An idea based on honey bee swarm for numerical optimizations. En: Technical Report TR06. 2005.

*Abejas empleadas*: las cuales se encargan de explotar las fuentes de alimento y contantemente comparten información sobre la rentabilidad de la fuente con las abejas recolectoras desempleadas.

*Abejas desempleadas*: entre las cuales se tienen dos tipos que son las exploradoras cuya función es estar constantemente buscando nuevas fuentes de alimento cercanas a la colmena y las observadoras que son quienes se encargan de elegir las mejores fuentes que serán explotadas con base en la información proporcionada por las abejas empleadas y exploradoras.

Cuando todas las abejas empleadas encuentran una fuente de alimento comparten esa información con las abejas observadoras por medio de una danza en la que indican la información de cercanía y el fitness de la fuente para ser seleccionada, luego cuando una fuente de alimento se termina o no mejora después de un cierto número de iteraciones las abejas deciden si se convierten en exploradoras u observadoras y se selecciona una fuente de alimento para reemplazar la que se agotó.

El algoritmo de la colonia artificial de abejas es un algoritmo bio-inspirado que trabaja de la siguiente manera, según Mezura et al<sup>2</sup>:

- ✓ Genera un conjunto (población) de soluciones (individuos) al problema.
- ✓ Evalúa cada solución en la función objetivo a optimizar.
- ✓ Selecciona la mejor
- ✓ Genera nuevas soluciones a partir de las mejores soluciones utilizando operadores de variación
- ✓ Evalúa las nuevas soluciones
- ✓ Escoge las soluciones que forman parte de la siguiente iteración (generación)

El algoritmo de colonia artificial de abejas es un algoritmo con pocos parámetros de entrada: Tamaño de la colmena (CS), el número total de ciclos del algoritmo (iteraciones) MCN, y el límite de ciclos que se mantendrá una solución antes de ser sustituida. A partir de allí se generan aleatoriamente las soluciones iniciales (SN) del problema y se evalúa la calidad de las soluciones<sup>3</sup>.

## **5. Herramienta computacional**

El lenguaje de programación que se usó para probar la eficiencia del algoritmo fue Go (Código libre desarrollado por google) versión 1.5. Una de las características claves por la cuales se programó en Go, es la adaptabilidad del código a múltiples plataformas, en este caso se integró con Google Maps para lograr una interfaz gráfica del algoritmo colonial artificial de abejas.

Esta programación se realiza enlazando paquetes. Un paquete a su vez, se construye a partir de uno o más archivos fuente que juntos declaran constantes, tipos, variables y funciones propias del paquete y que son accesibles en todos los archivos del mismo paquete. Estos elementos se pueden exportar y utilizar en otras interfaces. Go compila rápidamente a código máquina, es un lenguaje tipado estáticamente, compilado y por lo tanto rápido, que se siente como un lenguaje interpretado y tipado dinámicamente.

---

<sup>2</sup> MEZURA, E; CETINA, O y HERNANDEZ, B. Nuevas heurísticas inspiradas en la naturaleza para optimización numérica. En: Mecatrónica Editorial IPN. 2010. P. 249-272.

<sup>3</sup> BASTURK, Bahriye y KARABOGA, Dervis. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimizations: artificial bee Colony (ABC) algorithm. En: Journal Global Optimizations. 2007. Vol 39, pag. 459-471.

## **6. Conclusiones**

Con la implementación de la herramienta para la asignación de vehículos a las rutas de distribución, mediante el uso de una jerarquía en el peso asignado según la demanda, se logró acercarse a una equidad mayor en la liquidación de fletes como resultado de este proceso.

La construcción de la red de transporte para la distribución urbana de mercancías representa una herramienta importante en la toma de decisiones centrada en aumentar el índice de satisfacción del cliente.

Con la implementación de herramientas de Georreferenciación se puede tener una visualización más clara del problema de rotación de vehículos, igualmente de su solución.

Con la implementación del modelo de optimización y su técnica de solución, al tener una promesa de entrega para el cliente se pueden disminuir notablemente los indicadores de devoluciones de mercancía cuya causa esté relacionada directamente con los tiempos de entrega.

La aplicación del algoritmo de colonia artificial de abejas se constituye como una buena alternativa para solucionar problemas de optimización combinatoria.

## **7. Referencias**

ANTES, J., U. Derigs. 1995. "A new parallel tour construction algorithm for the vehicle routing problem with time Windows" working paper, Department of Economics and Computer Science, University of Köln, Germany.

BRAJEVIC, Ivona. 2012. Artificial bee Colony algorithm for the capacitated vehicle routing problem. En: University of Belgrade.

BRÂYSY, O. 2001. "Local search and variable neighborhood search algorithms for the vehicle routing problema with time Windows". Doctoral dissertation, University of Vaasa, Finland.

BALAKRISHNAN, N. 1993. "Simple heuristics for the vehicle routeing problema with soft time Windows". *J.Oper.Res.Soc.* 44 279-287.

BRAMEL, J., D. Simchi-Levi. 1996. "Probabilistic analyses and practical algorithms for the vehicle routing problema with time Windows". *Oper. Res.* 44 501-509.

BAKER, E.K., J. R. Schaffer. 1986. "Solution improvement heuristics for the vehicle routing and scheduling problema with time window constraints". *Amer.J.Math.Management Sci.* 6 261-300.

BAYKASOGLU, A.; OZBAKIR, L.; TAPKAN, P. 2007. Artificial bee Colony algorithm and its application to generalized assignement problem. En: F.T. Chan and M. K. Tiwari, editors. Pag. 113-144.

CASEAU, Y., F. Laburthe. 1999. "Heuristics for large constrained vehicle routing problems". *J.Heuristics* 5 281-303.

CORDENE, R., R. Wolfler-Calvo. 2001. "A heuristic for the vehicle routing problem with time Windows". *Journal of Heuristics* 7 107-129.

FOISY, C., J.-Y. Potvin. 1993. "Implementing an insertion heuristic for vehicle routing on parallel hardware". *Comput.Oper.Res.* 20 737-745.

DULLAERT, W. 2000. "Impact of relative route length on the choice of time insertion criteria for insertion heuristics for the vehicle routing problem with time Windows". B. Maurizio, ed. *Proc. Rome Jubilee*.

HAMACHER, A., C. Moll. 1996. "A new heuristic for vehicle routing with narrow time Windows". U. Derigs, W. Gaul, R. H. Mohring, K.-P. Schuster, eds. *Oper.ResProc.* 301-306.

IOANNOU, C., J.-Y. Potvin. 1993. "Implementing an insertion heuristic for vehicle routing on parallel hardware". *Comput.Oper.Res.* 20 737-745

KARABOGA, D.; AKAY, B.; OZTURK, C. 2007. Artificial bee Colony (ABC) optimization algorithm for training feed-forward neural networks. En: Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. Pag. 318-329.

KOSKOSIDIS, Y. A., W. B. Powell, M. M. Solomon. 1992. "An optimization-based heuristic for vehicle routing and scheduling with soft time window constraints". *Transportation. Sci.* 26 69-85.

LINDHOLM, María y BEHRENDTS, Sonke. 2012. Challenges in urban freight transport planning-a review in the Baltic Sea region. En: *journal of transport geography*. Vol 22, p 129-136

POTVIN, J.-Y., J.-M. Rousseau. 1993. "A parallel route building algorithm for the vehicle routing and scheduling problema with time Windows". *Eur.J.Oper.Res.* 66. 331-340.

POTVIN, J.-Y., J.-M. Rousseau. 1995. "An Exchange heuristic for routing problems with time Windows". *J.Oper.Res.Soc* 46 1433-1446.

RUSSELL, R.A. 1995. "Hybrid heuristics for the vehicle routing problema with time Windows. *Transportation*" *Sci.*29 156-166.

SKELLAM, J.G. 1954. A new method for determining the type of distribution of plant individuals. En: *Annals of Botany*. Pag. 213-227.

SAVELSBERGH, M. W. P. 1986. "Local search in routing problems with time windows". *Ann.Oper.Res.* 4 285-305.

SHAW, P. 1998. "Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems". CP98, *Lecture Notes in Computer Science*. Springer-Verlag, New York, 417-431. School of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, 16846-13114, Iran. PP 5.

THOMPSON, P. M., H. N. Psaraftis. 1993. "Cyclic transfer algorithm for multivehicle routing and scheduling problems". *Oper.Res.* 41 935-946.

VAN LANDEGHEM, H. R. G. 1988. "A bi-criteria heuristic for the vehicle routing problema with time Windows". *Eur.J.Oper.Res.* 36 217-226.

ZSETO, W; WU, Yonghong y HO, Sin. 2011. An artificial bee Colony algorithm for the capacitated vehicle routing problem. En: *European Journal of Operatinal Research*. 2011. Vol. 215, p. 126-135.

## **Biography**

**J. Arias-Osorio** is a Titular Professor, and Director of Master of Business Administration in the School of industrial and business studies at the Industrial University of Santander, Bucaramanga, Colombia. He earned B.S. in Systems Engineering from Industrial University of Santander, Colombia; Masters in Administration from Universidad Autónoma de Bucaramanga, Colombia. He has published journal and conference papers. Professor Arias-Osorio has completed research projects with many firms about freight distribution. His research interests include optimization, logistics, scheduling and supply chain.

**C. Suarez** is a B.S. in Industrial Engineering the School of industrial and business studies at the Industrial University of Santander, Bucaramanga, Colombia.