

Grupo de investigación GISMAR participó en el Congreso Internacional de Ciencias Básicas e Ingeniería CICI 2016 Villavicencio

María Janeth Bravo Montenegro

Docente del Programa de Ingeniería de Sistemas

Fredy Alexander Guasmayán Guasmayán

Docente Autoevaluación y Calidad
Universidad Mariana

CICI es uno de los eventos internacionales más importantes de la región de la Orinoquía colombiana, teniendo como objetivo fundamental propiciar el intercambio de experiencias académicas e investigativas en las ciencias básicas, ingeniería y afines; por parte de estudiantes, profesores, semilleros y grupos de investigación a nivel nacional e internacional, permitiendo la revisión del estado del arte, la actualización de métodos, técnicas y aplicaciones empleadas en las diferentes áreas temáticas y, promover la consolidación de redes de conocimiento en las áreas de interés.

CICI 2016 se realizó en la ciudad de Villavicencio del 19 al 21 de octubre de 2016. (Ver banner de la conferencia en la Figura 1).



Figura 1. Logos y banner del CICI 2016.

Con el apoyo del director del Programa de Ingeniería de Sistemas, Esp. Jesús Andrés Muñoz Guzmán y de las directivas de la Universidad Mariana, fue posible la participación del grupo de investigación GISMAR, con la ponencia en el evento académico realizado, obteniendo una publicación en las memorias CICI 2016 *Uniendo*

fronteras desde la Orinoquía para el mundo (ISBN: 978-958-8927-23-7).

Introducción

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la República de Colombia, está desarrollando estrategias como la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDDB), que busca desligar el crecimiento de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del crecimiento económico nacional (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010).

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea la solución del problema Multi Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP), incluyendo el consumo de combustible. El MDVRP es considerado como una generalización del Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) donde más de un depósito puede ser considerado, es decir, $|G| > 1$, siendo G un conjunto de depósitos, además, el vehículo debe empezar y terminar en el mismo depósito (Subramanian, 2012). En cuanto al consumo de combustible, es un factor que se incluye en esta investigación, ya que tiene incidencia directa en las emisiones de gases de efecto invernadero; según la literatura especializada, el porcentaje de consumo de combustible depende de variables diversas, considerando para el presente proyecto la carga de los vehículos; la importancia de incluir el consumo de combustible en el problema MDVRP radica en que la optimización del transporte no tiene que ver únicamente con minimizar la distancia recorrida sino también con minimizar los efectos perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana, que en la medida de su deterioro implicaría grandes costos.

Planteamiento del problema

El MDVRP consiste en encontrar y definir las rutas para un conjunto de vehículos encargados de la distribución de productos a diferentes clientes saliendo desde uno de varios depósitos y retornando al mismo, por las características combinatoriales de este problema y en relación al caso de prueba donde se cuenta específicamente con 2 depósitos y 154 sectores o clientes por atender se plantea una solución mediante el uso de metaheurísticas como es el caso del algoritmo genético

modificado de Chu Beasley (Chu

y Beasley, 1997). considerando condiciones usuales de este problema como:

1. Existe un número definido de vehículos, clientes, depósitos y productos.
2. Se trabaja con una flota de vehículos homogénea.
3. Todos los vehículos salen de un depósito y regresan a él.
4. Existe una matriz de costos dada por la distancia entre clientes incluyendo los depósitos.
5. Cada cliente se caracteriza por su ubicación y demanda de productos.
6. El gasto de combustible de los vehículos se considera asociado a la geografía del sitio de distribución de productos, por medio de un factor de sobre costo dado por el peso de la carga incluyendo este factor en la matriz mencionada en el numeral 4.

Bajo dichas consideraciones, la solución de este problema implica desarrollar estrategias para la asignación de clientes a los depósitos según la distancia y la capacidad del depósito y, otro aspecto es la definición de una ruta para cada vehículo en su depósito, de tal manera que el total de clientes sea atendido.

Modelo matemático

Con el fin de escribir matemáticamente el problema mencionado se toma como referencia el modelo planteado por Surekha y Sumathi (2011), en el cual se define una función objetivo dada por la minimización del costo de la distancia recorrida en cada una de las rutas desde los depósitos, en la cual este proyecto propone adicionar el factor de sobre costo por consumo de combustible en esta función.

Seguido a la función objetivo, se encuentra un conjunto de restricciones de acuerdo a la caracterización del problema, es decir que se limitan los recursos y se cumple con realizar únicas visitas a los clientes, salir y retornar una única vez al depósito correspondiente, hacer entrega de la totalidad del producto según la demanda que establezca el cliente como se muestra en el listado de ecuaciones a continuación.

Conjuntos:

I: Conjunto de depósitos

J: Conjunto de clientes

K: Conjunto de vehículos

Índices:

i: Índice del depósito

j: Índice del cliente

k: Índice de la ruta

Parámetros:

N: Número de vehículos

c_{ij} : Distancia entre punto *i* y *j*

V_i : Máxima capacidad para el depósito *i*

d_j : Demanda del cliente *j*

Q_k : Capacidad del vehículo (Ruta) *k*

P_v : Peso del vehículo vacío

Variables de decisión:

$x_{ijk} = 1$, si el cliente *j* sale del depósito *i* en la ruta *k*.

$x_{ijk} = 0$, en otro caso.

f_{ijk} : Factor de sobre costo por gasto de combustible

$z_{ij} = 1$, si el cliente *j* es asignado al depósito *i*

$z_{ij} = 0$, en otro caso

U_{jk} : Variable auxiliar para restricciones de eliminación de sub tours en la ruta *k*.

La función objetivo es minimizar la distancia total de todos los vehículos dados por la ecuación (3-12).

$$\text{Min} \sum_{i \in I \cup J} \sum_{j \in I \cup J} \sum_{k \in K} c_{ij} x_{ijk} f_{ijk} \quad (1)$$

El factor de sobre costo se considera de acuerdo a características del vehículo y la demanda de los clientes, teniendo en cuenta que en la medida que el vehículo realiza sus descargas o entregas el factor de sobre costo disminuye en proporción a la disminución del peso del mismo durante su recorrido, es decir que a menor carga del vehículo menor gasto de combustible.

De acuerdo a esto el factor (f_{ijk}) se escribe de la siguiente manera en la ecuación (1), se toma como referencia los aportes de Xiao (Xiao, Zhao, Kaku y Xu, 2012), teniendo en cuenta que a medida que la ruta avanza la carga disminuye. Cabe aclarar que el factor f_{ijk} actúa como un porcentaje de sobre costo en la función objetivo y en ningún momento altera la linealidad de la misma.

$$f_{ijk} = 1 + d_j / P_v \quad (2)$$

Cada cliente ha sido asignado a una única ruta. Ecuación (3).

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I \cup J} x_{ijk} = 1, j \in J \quad (3)$$

La restricción de capacidad para un conjunto de vehículos está dada por la ecuación (4).

$$\sum_{j \in J} d_j \sum_{i \in I \cup J} x_{ijk} \leq Q_k, k \in K \quad (4)$$

La ecuación (5) indica el nuevo conjunto de restricciones para la eliminación de sub tour.

$$U_{lk} - U_{jk} + Nx_{ijk} \leq N - 1, l, j \in J, k \in K \quad (5)$$

Las restricciones de conservación de flujo se indican en la ecuación (6).

$$\sum_{j \in I \cup J} x_{ijk} - \sum_{j \in I \cup J} x_{jik} = 0, k \in K, i \in I \cup J \quad (6)$$

Se asigna un único vehículo a cada ruta. Ecuación (7).

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} \leq 1, k \in K \quad (7)$$

La restricción de capacidad para los depósitos se indica en la ecuación (8).

$$\sum_{j \in J} d_j z_{ij} \leq V_i, i \in I \quad (8)$$

La restricción de la ecuación (9) específica que un cliente puede ser asignado a un depósito únicamente.

$$-z_{ij} + \sum_{u \in I \cup J} (x_{iuk} + x_{ujk}) \leq 1, i \in I, j \in J, k \in K \quad (9)$$

Las variables de decisión son de tipo binario. Ecuación (10) y Ecuación (11).

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, i \in I, j \in J, k \in K \quad (10)$$

$$z_{ij} \in \{0,1\}, i \in I, j \in J \quad (11)$$

Se define a la variable auxiliar con valores positivos. Ecuación (12).

$$U_{lk} \geq 0, l \in J, k \in K \quad (12)$$

Metodología de solución

La solución del problema se ha dividido en tres etapas, la primera corresponde a la asignación de clientes al depósito por medio de la generación de elipses con ángulos de rotación y radios aleatorios que permiten el intercambio de clientes entre depósitos.

La segunda etapa consiste en ejecutar una metodología híbrida en la solución del problema de ruteo basada principalmente en la implementación de un algoritmo genético de Chu Beasley [Chu y Beasley, 1997], el cual se caracteriza por la generación de una población inicial con soluciones previas al problema obtenidas a partir de métodos heurísticos y constructivos, cuidando además

que cada individuo de la población sea siempre diferente de los demás, conservando la diversidad poblacional del conjunto de alternativas de solución, que se actualizan con cada generación o iteración del algoritmo.

En una etapa final se considera el mejoramiento de las soluciones tanto de ruteo como de asignación por medio de algoritmos de intercambio inter depósitos e inter rutas, haciendo uso de elipses y mecanismos de intercambio como Shift 1-2, swap 1-2 y 2-opt (Piqueras, 2002).

Resultados

Al aplicar la metodología al problema se encuentra que para las instancias de Cordeau el algoritmo presenta un rendimiento adecuado según los valores óptimos presentados en las instancias.

Tabla 1. Soluciones encontradas

Caso de prueba	Valor óptimo	Función objetivo	% error mínimo
P01	576,87	576,8657	-0,0007
P02	473,53	473,5333	0,0007
P04	1001,59	1001,5871	-0,0003
P06	876,5	918,3885	4,7791
P08	4437,68	4557,1904	2,6931

En la Tabla 1 se encuentran instancias semejantes a las condiciones de un caso de prueba real en la que se describe los valores de la función objetivo encontrados, por lo que se puede aplicar esta metodología a un caso de distribución de productos lácteos real. De acuerdo con las condiciones de una empresa de distribución de productos lácteos en San Juan de Pasto, que actualmente realiza sus procesos desde un depósito, haciendo uso de 21 vehículos homogéneos que llevan el producto requerido a 151 sectores, en estas condiciones se corre el algoritmo y se encuentra que al incluir un segundo depósito se presenta un ahorro de 25,72%, respecto a considerar un solo depósito como se realiza actualmente la distribución de productos lácteos. Adicional, al considerar el costo de combustible se obtiene un ahorro del 4%. Dado porque el factor de sobrecosto de un vehículo a plena carga puede aumentar el consumo de combustible a un 20% de acuerdo con experimentos propios de esta investigación, realizados a los vehículos de la empresa; pese a que el gasto de combustible en los vehículos depende de otros factores como el tipo de motor, el tiempo de uso del vehículo, el mantenimiento de este, la carga y la vía por donde transita, los horarios de distribución (Malandraki y Daskin, 1992); por esta razón, el 20% indicado no aplica en todos los casos sino que es particular para este caso de prueba.

Conclusiones

En cuanto a la metodología, la asignación de clientes a los depósitos a partir de elipses se aproxima a una metaheurística, al actuar de forma aleatoria obteniendo soluciones mejoradas. Además, el uso de la metodología de agrupación de clientes por medio de elipses permite trabajar simultáneamente criterios

como vecindad entre clientes cercanos, cercanía al depósito e intercambio entre depósitos; por estas razones se concluye que el criterio utilizado es eficiente en la clusterización, siendo un aporte, ya que como se verifica en las referencias, únicamente se había utilizado la circunferencia.

El algoritmo genético de Chu Beasley permite generar una población cambiante, por lo tanto, se presentan individuos que mueven a la población en general hasta encontrar una buena solución. Incluso, la mutación y el mejoramiento hacen que las iteraciones se reduzcan y el algoritmo genético converja con mayor velocidad.

En cuanto al caso de prueba, la metodología desarrollada es apropiada para solucionar el caso real de distribución de productos lácteos, considerando 2 depósitos y 151 clientes, porque el algoritmo llega a la mejor solución en 3 de las instancias diseñadas por Cordeau, y se aproxima con un porcentaje de error permisible del 2,6% hasta 4,8% en 2 casos más, desde 50 clientes con 2 y 4 depósitos hasta 249 clientes con 2 depósitos.

Se observa que la distancia prima sobre la carga, debido a que no es posible descargar en orden estrictamente descendente los productos, porque la distancia se incrementaría de forma considerable, teniendo un efecto contraproducente en el gasto de combustible, por lo tanto, la metodología considera la descarga de productos al inicio sin incrementar la distancia; es decir, se tiene en cuenta el peso a descargar y la distancia recorrida, al tener presente el factor de sobre costo entonces se da preferencia a la distancia o a la carga según convenga.

El gasto de combustible es alto en la forma como se realiza la distribución de los productos lácteos actualmente, puesto que los vehículos salen cargados y realizan un gran recorrido desde el depósito hasta la entrada a la ciudad; por lo tanto, si la empresa realiza el ruteo desde dos depósitos que funcionan como bodega y oficinas, la disminución de distancia es significativa y el gasto de combustible también disminuye.

El algoritmo desarrollado utilizando 2 depósitos, produjo un mejoramiento del 25,72% con respecto a la forma en que se realiza la distribución de productos lácteos con 1 depósito. Adicionalmente, se produce un ahorro del 4% al considerar en la función objetivo el consumo de combustible.

Bibliografía

Chu, P. y Beasley, J. (1997). A genetic algorithm for the generalised assignment problem. *Comput. Oper. Res.*, 24(1), 17-23.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2010). Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono. República de Colombia Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014. Recuperado de <http://www.minambiente.gov.co>.

Gallego, R., Escobar, A. y Toro, R. (2008). *Técnicas Metaheurísticas de Optimización* (2da. ed.). Pereira.

Malandraki, C. y Daskin, M. (1992). Time dependent vehicle routing problems: Formulations, properties and heuristic algorithms. *Transportation Science*, 26(3), 185-200.

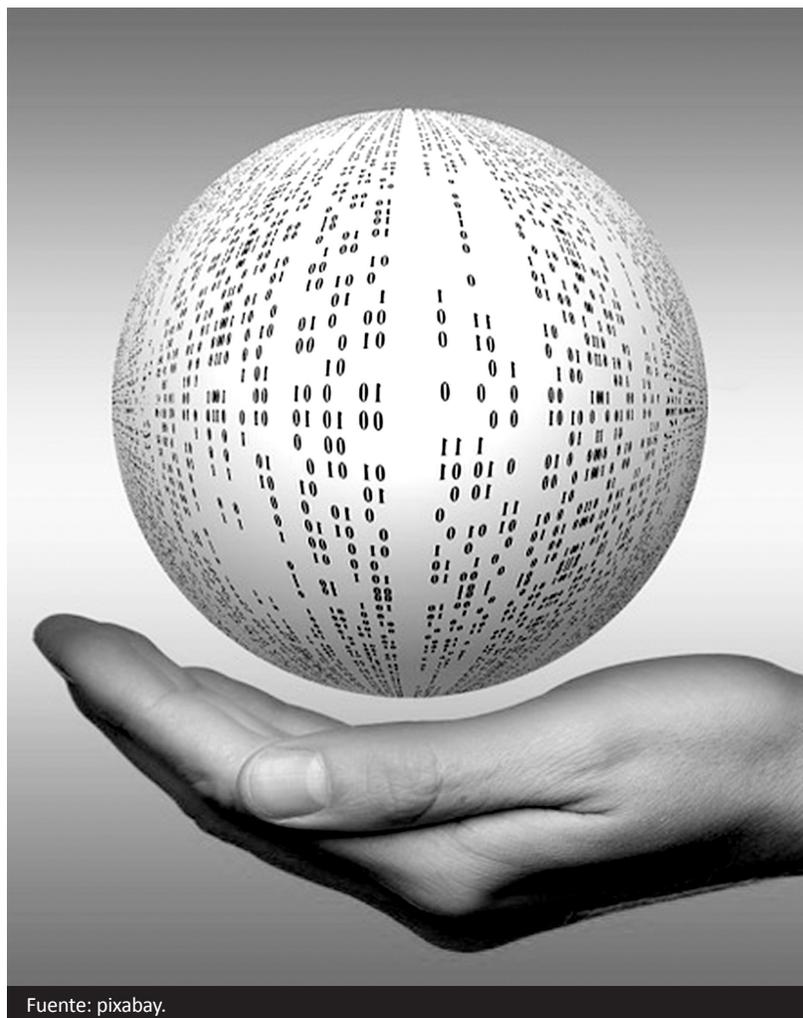
Piqueras, Y. (2002). *Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW*. (Tesis Doctoral). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Valencia, España.

Subramanian, A. (2012). Heuristic, Exact and Hybrid Approaches for Vehicle Routing Problems. Universidade Federal Fluminense.

Surekha, P. y Sumathi, S. (2011). Solution To Multi-Depot Vehicle Routing Problem Using Genetic Algorithms. *World Appl. Program.*, 1(3), 118-131.

Toro, E., Restrepo, Y. y Granada, M. (2006). Algoritmo Genético Modificado aplicado al problema de secuenciamiento de tareas en sistemas de producción lineal - Flow Shop. *Sci. Tech.*, 12(30), 159-164.

Xiao, Y., Zhao, Q., Kaku, I. y Xu, Y. (2012). Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem. *Comput. Oper. Res.*, 39(7), 1419-1431.



Fuente: pixabay.