

# Propuesta de un modelo de ruteo de vehículos abierto en una institución prestadora de servicios de salud \*

## Byron Campo Zuñiga

Universidad del Atlántico, Puerto Colombia - Atlántico - Colombia.

bdcampo@uniatlantico.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0003-0557-5623>

## Adel Mendoza Mendoza

Docente de tiempo completo Universidad del Atlántico, Puerto Colombia - Atlántico - Colombia.

adelmendoza@uniatlantico.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0002-4278-1226>

## RESUMEN

En este artículo de investigación se presenta un modelo de optimización basado en la aplicación de dos heurísticas para una situación real de enrutamiento de una flota de vehículos de una Institución Prestadora de Servicios de Salud (IPS) para transportar sus pacientes. Se realizó un estudio cuantitativo mediante la aplicación de las heurísticas del vecino más cercano y la del vecino más cercano modificada ya que este tipo de enrutamiento es del tipo COVRP, por sus siglas en inglés: capacited opened vehicle routing problem. Se presenta la tabla de desglose de los costos, el algoritmo de construcción de la matriz de distancias y los algoritmos para las heurísticas. Los resultados indican que la heurística del vecino más cercano ofrece una solución con un costo menor que la del vecino más cercano modificada ya que los ahorros serían del 7,34% y 6,05% respecto al costo actual.

## PALABRAS CLAVE

Heurística, enrutamiento de vehículos, algoritmo, COVRP

## Proposal for an open vehicle routing model in a health-care institution

## ABSTRACT

This research article presents an optimization model based on the application of two heuristics for a real situation of routing a fleet of vehicles of an Institution Provider of Health Services (IPS) to transport their patients. A quantitative study was carried out by applying the heuristics of the nearest neighbor and that of the modified nearest neighbor as this type of routing is of the COVRP type, for its initials in English: capacitated open vehicle routing problem. The cost table, the distance matrix construction algorithm and the heuristic algorithms are presented. The results indicate that the nearest neighbor heuristic offers a solution with a lower cost than that of the modified nearest neighbor since the savings would be 7.34% and 6.05% with respect to the current cost.

## KEYWORDS

Heuristics, vehicle routing, algorithm, COVRP

Recibido: 27/01/2018 Aceptado: 05/05/2018

\* <http://dx.doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.4761> Este es un artículo Open Access bajo la licencia BY-NC-SA (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>) Publicado por Universidad Libre - Cali, Colombia.

Cómo citar este artículo: CAMPO ZUÑIGA, Byron; MENDOZA MENDOZA, Adel. Propuesta de un modelo de ruteo de vehículos abierto en una institución prestadora de servicios de salud. En: Entramado. Julio - Diciembre, 2018. vol. 14, no. 2, p. 288-298 <http://dx.doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.4761>



# Proposta de um modelo de roteamento aberto de veículos em uma instituição prestadora de serviços de saúde

## RESUMO

Este artigo de pesquisa apresenta um modelo de otimização baseado na aplicação de duas heurísticas para uma real situação de roteamento de uma frota de veículos de uma Instituição de Prestadores de Serviços de Saúde (IPS) para o transporte de seus pacientes. Um estudo quantitativo foi realizado aplicando as heurísticas do vizinho mais próximo e do vizinho vizinho modificado, uma vez que esse tipo de roteamento é do tipo COVRP, por sua sigla em inglês: capacited open vehicle routing problem. A tabela de decomposição de custos, o algoritmo para a construção da matriz de distância e os algoritmos para as heurísticas são apresentados. Os resultados indicam que a heurística do vizinho mais próximo oferece uma solução com custo menor que o vizinho mais próximo modificado, uma vez que a economia seria de 7,34% e 6,05% em relação ao custo atual.

## PALAVRAS-CHAVE

Heurística, roteamento de veículos, algoritmo, COVRP

## Introducción

En un problema de enrutamiento de vehículos VRP (*vehicle routing problem*) se pretende diseñar las rutas de una flota de transporte que sirve a un conjunto de clientes. Cada vehículo parte de un depósito principal, recorre un determinado número de clientes, y finalmente vuelve al depósito principal (ciclo hamiltoniano). Los clientes o nodos deben ser visitados una única vez por un único vehículo, y la demanda agregada de todos los nodos asignados a un vehículo no debe superar su capacidad. Un problema de enrutamiento abierto de vehículos OVRP (*open vehicle routing problem*) es una variante trivial del clásico VRP, que difiere en que, una vez cada vehículo sirve a todos y cada uno de los nodos que le han sido asignados, no está obligado a volver al depósito (camino hamiltoniano). En otras palabras, cada ruta en el OVRP parte desde el depósito inicial, y termina necesariamente en un cliente. Desde esta perspectiva, el OVRP cuenta con un gran atractivo para organizaciones que optan por subcontratar una flota de vehículos en lugar de adquirir una propia. (Sariklis and Powell, 2000; Tarantilis, *et al.* 2005; Repoussis, *et al.* 2007).

En la institución prestadora de salud (IPS), donde se desarrolló el presente estudio, se brinda atención a pacientes no crónicos, que por su condición de discapacidad mental y movilidad reducida deben ser trasladados desde sus lugares de residencia hasta la sede principal de la IPS, para recibir la asistencia médica que necesitan. El diseño de las rutas, y la consecuente asignación de los pacientes a cada una de ellas, obedece a un criterio netamente empírico que realiza un profesional de salud funcionario de la IPS que no cuenta con los conocimientos y las técnicas de optimización logística. Como consecuencia, durante la operación del sistema los vehículos se ven envueltos en atascamientos innecesarios

de tránsito, demoras y tiempos y distancias recorridas por encima de lo previsto, y que afectan, no solo a los pacientes transportados, sino los costos finales de todo el sistema.

Por lo anterior esta investigación tiene como objetivo proponer un diseño de rutas y asignación de pasajeros que reduzca los costos de prestación de servicios para una Institución Prestadora de Servicios de Salud (IPS)

## I. Marco teórico

EIVRP fue introducido por primera vez en los años cincuenta y sesenta por Dantzig, *et al.* (1954), Dantzig, *et al.* (1959), y Clarke and Wright (1964), mientras que el OVRP, fue desarrollado de la mano de Schrage (1981), mucho después. En esa oportunidad solo se propuso el problema, pero no se le dio nombre ni formulación formal ni propuesta de solución. Poco más tarde, Raff (1983) presentaría la primera solución a un problema de éste tipo.

Seguirían algunos trabajos, como los de Fu and Wright (1994), Ben Atkinson (1990), y Li and Fu (2002), antes de que Sariklis and Powell (2000) hiciera su formulación formal y le otorgara el nombre con el que hoy se conoce. Con la llegada del nuevo milenio, y con el auge que la tercerización de servicios ha experimentado en los últimos años, el OVRP ha dejado de ser tímidamente abordado y ha cobrado gran relevancia. Esto debido a que cada vez más empresas optan por subcontratar el servicio de transporte en vez de adquirir una flota propia para tal fin. Por lo anterior, el OVRP se clasifica en la categoría de problemas de logística de terceros o 3PL (third party logistics), de acuerdo a autores como Hedar and Abdallah (2014); Repoussis, *et al.* (2007); Russell, *et al.* (2008) y Tarantilis, *et al.* (2005)

Además de desarrollar un modelo de optimización de rutas de una situación de la vida real, nuestro interés en el OVRP es motivado por su importancia práctica y teórica. En el plano práctico y desde una perspectiva comercial, numerosas actividades de distribución en el mundo real encajan en el marco del OVRP, por ejemplo, la distribución tercerizada de paquetes y/o mercancías, o el transporte de pasajeros como el caso del reparto de estudiantes al final de la jornada escolar. En la bibliografía disponible, se pudieron encontrar algunas aplicaciones reales. Por ejemplo, el reparto de periódicos (Russell, 2013; Russell, *et al.* 2008; Sevkli and Güler, 2017), la generación de rutas de entrega con flota de aviones (Raff, 1983), el transporte ferroviario de mercancías (Fu and Wright, 1994), la distribución de productos lubricantes (Repoussis, *et al.* 2009b), el transporte de material en una mina de carbón (Guo and Yu, 2012; Yu, *et al.* 2011), el transporte escolar (López-Sánchez, *et al.* 2014; GurpreetSingh and Dhir, 2014; Özyurt, *et al.* 2006; Bektas and Elmas, 2007), la entrega de comidas escolares (Ben Atkinson, 1990), la distribución de los cables en parques eólicos marinos (Bauer and Lysgaard, 2015), el sistema de transporte de un centro de distribución a supermercados (Tarantilis, *et al.* 2005), el transporte de pasajeros en buses intermunicipales (Scárdua, *et al.* 2016), entre otros.

La importancia teórica del OVRP radica en que es un problema de optimización combinatoria del tipo NP-hard. Resolver el OVRP, esto es: encontrar una solución pseudo-óptima en un tiempo de computo máximo preestablecido, implica construir el mejor camino hamiltoniano para cada grupo de clientes asignado a un vehículo. Como dicha asignación es de naturaleza combinatoria NP-Hard, el OVRP también lo es (Syslo, *et al.* 1983). Un modelo de programación entera del OVRP se puede consultar en los trabajos de Sevkli and Güler (2017); Shamshirband, *et al.* (2015); MirHassani and Abolghasemi (2011).

Para intentar dar solución al OVRP se han implementado distintas técnicas heurísticas a lo largo de los años. Las heurísticas buscan de manera aleatoria (estadística) e iterativa, encontrar soluciones pseudo óptimas dentro del conjunto de puntos del espacio muestral. Una solución pseudo óptima es la que, sin garantía de ser el óptimo global, mejora las soluciones actuales, normalmente empíricas, y a veces construidas por prueba y error en la vida real. Dentro de las que han sido usadas para dar solución al OVRP podemos resaltar: branch-and-cut (Pessoa, *et al.* 2008; Letchford, *et al.* 2007), voraz (Yilmaz, *et al.* 2014; Repoussis, *et al.* 2007; Ben Atkinson, 1990), Clark and Wright (Pichpibul and Kawtumachai, 2013; Özyurt, *et al.* 2006), agrupar primero rutear después (Sariklis and Powell, 2000), programación lineal entera ILP (Salari, *et al.* 2010), búsqueda en vecindario variable VNS y sus variantes (Subramanian, *et al.* 2013; Reinholz and

Schneider, 2013; Redi, *et al.* 2013; Penna, *et al.* 2012; Sevkli and Güler, 2017; Kritzing, *et al.* 2016), búsqueda local LS y sus variaciones (Schopka and Kopfer, 2016; Soto, *et al.* 2017; Chen, *et al.* 2016; Yilmaz, *et al.* 2014; Zachariadis and Kiranoudis, 2010), búsqueda amplia (Pisinger and Ropke, 2007), generación por columnas (Yousefikhoshbakht and Dolatnejad, 2017; Yousefikhoshbakht, *et al.* 2016), hiper-heurísticas (Tyasnurita, *et al.* 2017), entre otros.

Un papel preponderante, dentro del conjunto de técnicas implementadas para dar solución al OVRP, ha sido el de los métodos metaheurísticos. Estos métodos, como los heurísticos, buscan de manera iterativa soluciones pseudo-óptimas, pero a diferencia de ellos, sus algoritmos están inspirados y construidos para imitar un patrón de comportamiento o ciertos fenómenos de la naturaleza. Dentro de los que se han construido para tal fin se encuentra la búsqueda tabú (Russell, 2013; Wang, *et al.* 2012; Li, *et al.* 2012; Jinhui, *et al.* 2012; Yu, *et al.* 2011; Derigs and Reuter, 2009; Hedar and Abdallah, 2014), el recocido simulado (Vincent, *et al.* 2016; Ge, *et al.* 2010; Li, *et al.* 2007), el algoritmo genético (Wang, *et al.* 2015; Liu, *et al.* 2014b,a; Yilmaz, *et al.* 2014; Cao, *et al.* 2014; Guo and Yu, 2012; Ren, 2011; Yang and Zhao, 2010), la optimización por colonia de hormigas (Yousefikhoshbakht, *et al.* 2015; Sedighpour, *et al.* 2014; GurpreetSingh and Dhir, 2014; Ashouri and Yousefikhoshbakht, 2017; Ge, *et al.* 2016), la optimización por cúmulo de partículas (Naderipour and Alinaghian, 2016; Norouzi, *et al.* 2012; MirHassani and Abolghasemi, 2011; Hu and Wu, 2010), el algoritmo de selección clonal (Pan and Fu, 2009), el algoritmo de búsqueda gravitacional (Hosseinabadi, *et al.* 2016a,b), el algoritmo de optimización por apareamiento de abejorros (Marinakis and Marinaki, 2011a,b), el algoritmo memético (Repoussis, *et al.* 2010; Labadie, *et al.* 2016), algoritmo del imperialista competitivo (Shamshirband, *et al.* 2015; Yousefikhoshbakht, *et al.* 2012), el algoritmo evolutivo (Zhao, *et al.* 2010; Repoussis, *et al.* 2010; Cao and Lai, 2010; Zhang, *et al.* 2009), entre otros.

Aunque en la mayoría de los algoritmos implementados intentan minimizar los costos de operación y el número de vehículos empleados, es posible encontrar algunos trabajos cuyos objetivos pretenden minimizar otras variables, como el tiempo de recorrido (Li and Fu, 2002), la distancia recorrida (Shamshirband, *et al.* 2015; Marinakis and Marinaki, 2011a), el número de vehículos de la flota (Hosseinabadi, *et al.* 2016b; Chen, *et al.* 2016; Hosseinabadi, *et al.* 2016a; Marinakis and Marinaki, 2011b), el tiempo que invierte el vehículo en una persona (Wang, *et al.* 2015), la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (Naderipour and Alinaghian, 2016), el uso de los vehículos (Lalla-Ruiz, *et al.* 2016; Lalla-Ruiz and Voß, 2016), entre otros.

Cuando se añade una restricción de capacidad a los vehículos los autores prefieren llamar a este problema: capacitated open vehicle routing problem -COVRP- (Fu, 2004; Letchford, *et al.* 2007; Pessoa, *et al.* 2008). Esta no es la única variante del OVRP. Existen, en la literatura disponible, algunas otras que podemos mencionar: multidepósito -MDOVRP- (Soto, *et al.* 2017; Lalla-Ruiz, *et al.* 2016; Liu, *et al.* 2014b,a; Lalla-Ruiz and Voß, 2016), con cross-docking -OVRPCD- (Vincent, *et al.* 2016), con flota heterogénea fija -HFFOVRP- (Ruiz, *et al.* 2016; Yousefikhoshbakht, *et al.* 2015; Penna, *et al.* 2012; Li, *et al.* 2012; Ren, 2011; Yousefikhoshbakht and Dolatnejad, 2017; Yousefikhoshbakht, *et al.* 2016), limitado a ventanas de tiempo -OVRPTW- (Redi, *et al.* 2013; Repoussis, *et al.* 2009a, 2007), limitado a ventanas suaves de tiempo -OVRPSTW- (Jinhui, *et al.* 2012; Fenghua and Xiaonian, 2008), limitado a ventanas rígidas de tiempo -OVRPHTW- (Wang, *et al.* 2012), robusto o con demanda incierta -ROVRP, (Cao, *et al.* 2014), con demanda difusa -OVRPFD- (Cao and Lai, 2010), con restricciones de zona -OVRPZC- (Russell, *et al.* 2008), con nodos de cierre o homedepots -OVRP-d- (Aksen, *et al.* 2007), con tiempo máximo de entrega -OVRPTD- (Aksen, *et al.* 2007; Özyurt, *et al.* 2006), para varias empresas aliadas -MEAOVRP- (Yang and Zhao, 2010), con competencia entre distribuidores -OVRPCTW- (Norouzi, *et al.* 2012), con entrega dividida -SDOVRP- (Chen, *et al.* 2016), multiproducto -OVRPMP- (Yilmaz, *et al.* 2014; Russell, *et al.* 2008), planar -POVRP- (Bauer and Lysgaard, 2015), invertido -ROVRP- (Schopka and Kopfer, 2016), dependiente del tiempo -OTDVRP- (Naderipour and Alinaghian, 2016), balanceado -BOVRP- (López-Sánchez, *et al.* 2014), con recogidas y entregas -OVRPPD- (Ben Atkinson, 1990; Tambunan and Mawengkang, 2015), con puntos de reclamo -OVRPDP- (Atefi, *et al.* 2018), y mezclas entre ellos (Schopka and Kopfer, 2016; Wang, *et al.* 2015; Yilmaz, *et al.* 2014; Norouzi, *et al.* 2012; Tambunan and Mawengkang, 2015).

## 2. Metodología

El enfoque metodológico seleccionado para el desarrollo de esta investigación es cuantitativo soportado en la aplicación de técnicas de la investigación de operaciones para la construcción de un modelo de optimización de enrutamiento abierto de vehículos con restricción de capacidad COVRP de una Institución Prestadora de Servicios de Salud IPS de la ciudad de Barranquilla (Colombia), haciendo uso de dos heurísticos: algoritmo del vecino más cercano NN (por sus siglas en inglés Nearest Neighbour Algorithm), y algoritmo modificado del vecino más cercano, con el objetivo de encontrar la mejor solución. Cuando decimos «solución» hacemos referencia a la asignación recursiva de los nodos a las rutas, de tal manera que se logre la utilización mínima de vehículos a la vez que se logra la disminución de los costos de transporte.

Durante el periodo comprendido entre agosto 2016 y mayo 2017, la IPS en cuestión ha experimentado un aumento en el costo de transporte como se muestra en la Figura 1. Ello se debe, no solo al aumento de la cobertura hospitalaria, sino, a un enrutamiento ineficiente de los nuevos clientes. Por lo anterior, se requiere entonces de un diseño de rutas y asignación de pasajeros con un criterio científico que reduzca los costos de prestación de servicios, optimice los tiempos de transporte y minimice el número de vehículos, así como la utilización de sus capacidades. Por sus características y restricciones, esta situación de la vida real encaja en el modelo del OVRP con restricción de capacidad

Los algoritmos que se emplearon para dar solución al problema propuesto hacen uso de la estructura de costos de la operación de los vehículos que componen la flota empleada, y de las distancias entre todos y cada uno de los nodos (pa-

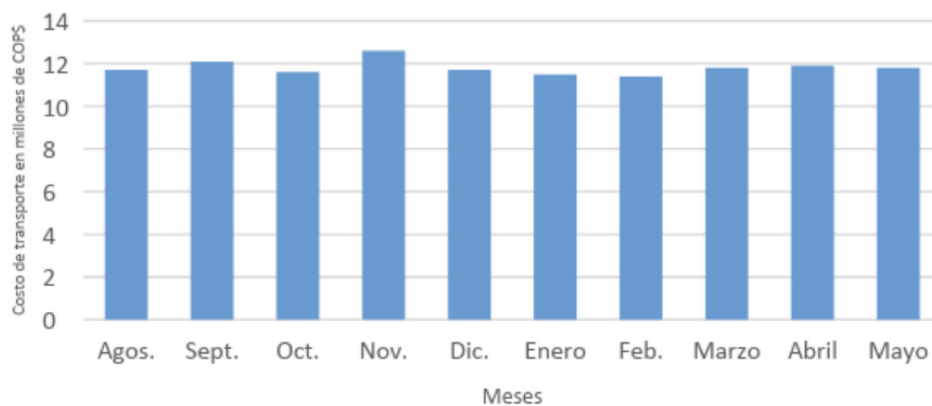


Figura 1. Costo mensual de transporte de pacientes. 2016-2017

Fuente: Los autores



cientes) del problema. Una vez obtenidos estos parámetros se construyeron tres algoritmos: el de la distancia euclidiana entre nodos, el del vecino más cercano (NN), y el modificado del vecino más cercano (NN modificado). A continuación, se presentan las estructuras de los algoritmos.

### 2.1. Estructura de costos

Con el propósito de obtener los costos asociados al problema, se consultó la estructura de costos de la flota empleada. Los costos variables obedecen, básicamente, al consumo de combustible, el uso del aceite del motor y su filtro, el aceite de la caja de cambios, y el desgaste de los neumáticos. Los costos fijos obedecen al salario del conductor, a los servicios de aseo y limpieza, y a la amortización diaria de los seguros e impuestos anuales del vehículo. Los costos se calcularon con base en un vehículo camioneta tipo van, con capacidad para catorce pasajeros ( $Q = 14$ , marca CHANGAN, de referencia STAR7, modelo 2017 y de fabricación china). En las Tablas 1 y 2, se presenta el desglose de los costos variables y fijos, respectivamente. En ellas se observa un costo variable por kilómetro  $cv = \$256,29$  y un costo fijo por vehículo  $cf = \$67\ 087$ .

Tabla 1.  
Costos variables.

Ítem	Tasa de Consumo	Costo Promedio	Costo Total Unitario
Combustible	35 km/galón	\$7855,61/galón	\$224,45 /km
Lubricantes	50000 km/cambio	\$470000 / cambio	\$9,40 /km
Llantas	50000 km/cambio	\$456000/ cambio	\$9,12 /km
		TOTAL	\$256,29 /km

Fuente: Los autores, 2017

Tabla 2.  
Costos fijos.

Ítem	Costo Anual	Amortización Diaria
Seguro Extracontractual	\$1.400.000	\$5.385
Seguro Contractual	\$2.500.000	\$9.615
SOAT	\$350.000	\$1.346
Impuesto transito	\$175.000	\$673
Mtto preventivo	\$600.000	\$2.308
Salarios	\$12.417.492	\$47.760
	TOTAL	\$67.087

Fuente: Los autores, 2017

La reducción porcentual se estimará comparando los costos estimados con cada heurística ( $cv \sum dk + kcf$ , donde  $dk$  es la distancia total recorrida de la  $k$ -ésima ruta, y  $K$  es número total de rutas programadas), con el costo promedio diario en transporte de los últimos diez meses en la organización y que asciende a \$418 451.

### 2.2. Matriz de distancias

Para obtener la distancia  $d_{ij}$  entre cada uno de los nodos se hizo uso de la ecuación (1) que es la aproximación que propone el SIAMAC (Centro de Información de la Amazonía Colombiana) para obtener la distancia euclidiana entre dos coordenadas geográficas geodésicas en el sistema WGS84 (SIAMAC and Universidad Nacional de Colombia Sede Amazonía, 2010).

El suministro de las direcciones de los domicilios de los pacientes por parte de la IPS, permitió el uso del Sistema de Información Geográfica Google Maps. Esta información se utilizó para obtener la matriz con las coordenadas geográficas geodésicas en el sistema WGS84 de todos los nodos

$$d_{ij} = \sqrt{[84,8(x_j - x_i)]^2 + [110,56(y_j - y_i)]^2} \quad (1)$$

Donde  $(x_i; y_i)$  y  $(x_j; y_j)$  son las coordenadas geodésicas del nodo  $i$  y del nodo  $j$ , respectivamente;  $d_{ij}$  esta dado en km. La matriz de distancias  $D$  se obtuvo con el Algoritmo 1.

#### Algoritmo 1. Matriz de distancia

**Entrada:** Las coordenadas  $(x_i; y_i)$  de todos los nodos.

**Salida:** Distancia  $D$

- 1: for  $i = 0$  hasta el último nodo do
- 2: for  $j = 0$  hasta el último nodo do
- 3:  $d_{ij} = \sqrt{[84,8(x_j - x_i)]^2 + [110,56(y_j - y_i)]^2}$
- 4:  $D[i; j] = d_{ij}$
- 5: end for  $i$
- 6: end for  $j$

### 2.3. Algoritmo del vecino más cercano

La técnica NN es una heurística de inserción secuencial. Las heurísticas de inserción son métodos constructivos en los cuales se crea una solución mediante sucesivas inserciones de nodos (viviendas) en las rutas. En cada iteración se tiene

una solución parcial cuyas rutas sólo visitan un subconjunto de los clientes y se selecciona un cliente no visitado para insertar en dicha solución. En las heurísticas de inserción secuencial sólo se considera insertar clientes en la última ruta creada. El algoritmo de vecino más cercano genera rutas uniendo vértices, puntos o nodos, teniendo en cuenta la arista con la menor distancia o costo de un punto al resto de puntos.

**Algoritmo 2. NN para el COVRP**

**Entrada:** D; q<sub>i</sub>, la demanda del i-ésimo nodo; Q.

**Salida:** R, la matriz de rutas; costos totales

- 1:  $C = c_v D$ .
- 2: Costos actuales acumulados  $\leftarrow 0$ .
- 3: Activar la primera ruta en R.
- 4: Ocupación de la primera ruta  $\leftarrow 0$ .
- 5: Nodo actual  $\leftarrow$  Depósito.
- 6: **while** Nodos asignados  $\leq$  Total de nodos **do**
- 7:     En el renglón del nodo actual, buscar la distancia más corta en la j-ésima columna de D.
- 8:     En el renglón del nodo actual, buscar el costo de ir desde el renglón del nodo actual hasta la j-ésima columna de C.
- 9:     **if** Ocupación de la ruta actual + q<sub>j</sub> > Q **then**
- 10:         Activar una nueva ruta en R.
- 11:         Ocupación de la nueva ruta  $\leftarrow 0$ .
- 12:         Nodo actual Depósito.
- 13:     **end if**
- 14:     Asigne el j-ésimo nodo a la ruta actual.
- 15:     Sumar q<sub>j</sub> a la ocupación de la ruta actual.
- 16:     Eliminar la j-ésima columna de D.
- 17:     Sumar el costo de ir al nodo actual a los costos actuales acumulados.
- 18:     Nodo actual  $\leftarrow j$ .
- 19: **end while**
- 20: Costos fijos totales  $\leftarrow$  cf x número de rutas en R.
- 21: Sumar los costos fijos totales a los costos actuales acumulados. Estos son los costos totales

**2.4. Algoritmo modificado del vecino más cercano**

Este algoritmo resulta de la modificación propuesta en Eppen (2000) para la matriz de distancias D, una vez se obtiene esta matriz, se encuentra el valor máximo por columna. Luego se obtiene la matriz de distancias modificada D\*

$$D^* = \begin{matrix} & \text{máx}(d_{i1}) - d_{11} & \text{máx}(d_{i2}) - d_{12} & \dots & \text{máx}(d_{in}) - d_{1n} \\ \text{máx}(d_{i1}) - d_{21} & & \text{máx}(d_{i2}) - d_{22} & \dots & \text{máx}(d_{in}) - d_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{máx}(d_{i1}) - d_{n1} & & \text{máx}(d_{i2}) - d_{n2} & \dots & \text{máx}(d_{in}) - d_{nn} \end{matrix}$$

Con esta modificación es alimentado el algoritmo 2 haciendo un cambio en las líneas 7 y 16 se debe reemplazar D por D\*.

**3. Resultados**

Los algoritmos se programaron en un script .m y se corrieron en el software GNU Octave v4.2.1 en un computador con procesador Intel Core i3-2330, con 6Gb de memoria RAM, y con ArchLinux-Openbox como sistema operativo.

La Tabla 3 muestra la propuesta de enrutamiento haciendo uso de la heurística NN, mientras que la Tabla 4 muestra las rutas con base en la heurística NN modificada. Como se espera en toda heurística voraz, a las primeras rutas se les ha asignado los nodos más cercanos, mientras que los nodos más lejanos han sido asignados en las últimas iteraciones. Es por ello que no existe una distribución equitativa de las rutas por lo que las primeras rutas recorran mucha menos distancia en mucho menos tiempo.

La Figura 2 hace una comparación de las heurísticas en cuanto a la distancia recorrida de cada ruta. En ella se observa una diferencia sustancial en la ruta número 3; en menor proporción, la de las rutas 4 y 5, por último, en un rango más pequeño se encuentran en las rutas 1 y 2. Pese a que se espera que las últimas rutas sean más costosas que las primeras, la ruta 3 para el algoritmo NN y la ruta 4 para el NN modificado rompen el sentido común. Dichas rutas presentan una disminución en la distancia recorrida total frente a la inmediatamente anterior enrutada. Esto puede deberse a la naturaleza misma del problema particular, ya que en esas rutas se asignaron los nodos con mayor número de pacientes, evitando así recorridos adicionales en las rutas posteriores. Como también se esperaba, la última ruta construida presenta un costo inferior a las anteriores en ambas heurísticas porque es la que menor número de pasajeros ocupa.

Los costos totales, los tiempos de cómputo y la reducción relativa que se obtuvo con cada heurística, se muestran en la Tabla 5. Aquí se observa un costo inferior con el programa propuesto por la heurística NN, frente al de la heurística NN modificada. Sin embargo, ésta última presenta un tiempo de cómputo inferior.

Tabla 3.

Programación de rutas por algoritmo Heurística NN

Ruta	Pacientes asignados															$d_k$ (km)	Costo diario por ruta (\$)
I	43	38	44	61	37	42	7	40	14	15	9	28	12	29	11,29	69980,98	
II	36	58	24	23	10	51	45	54	25	41	62	56	64	14,43	70785,48		
III	53	57	34	30	13	20	6	35	2	48	3	5	19	32	12,02	70168,32	
IV	66	33	50	47	63	17	26	27	52	22	46	11	59	55	33,53	75681,14	
V	39	65	31	21	8	16	18	49	4	60	29,37	74614,24					

Fuente: Los autores

Tabla 4.

Programación de rutas por algoritmo Heurística NN modificada

Ruta	Pacientes asignados															$d_k$ (km)	Costo diario por ruta (\$)
I	43	38	44	15	53	29	57	51	14	37	61	42	7	40	13,20	70469,35	
II	12	28	9	23	24	58	36	10	25	54	45	41	62	16,39	71288,06		
III	50	60	4	55	59	49	18	21	8	16	46	11	5	3	54,82	81135,82	
IV	66	33	47	63	17	26	27	32	19	22	52	48	2	35	23,71	73163,61	
V	34	30	13	56	64	20	6	31	39	65	12,19	70211,07					

Fuente: Los autores

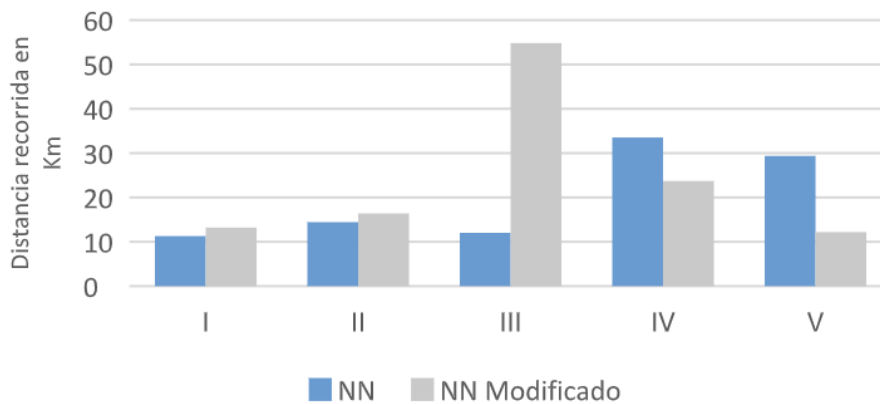


Figura 2. Comparativo de distancia recorrida por ruta por método.

Fuente: Los autores

Tabla 5.

Costos por heurística.

Heurística	Costo total diario	Reducción relativa	Tiempo computo
NN	\$361.230	7,34%	180,65 ms
NN Modificado	\$366.267	6,05%	157,77 ms

Fuente: Los autores

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se presenta como solución a un problema de enrutamiento abierto de vehículos de la vida real, transporte de pacientes de una institución prestadora de salud (IPS), una propuesta de recorridos obtenida con dos técnicas voraces para la flota que se dispone: heurística del vecino más cercano y heurística del vecino más cercano modificado teniendo en cuenta que el enrutamiento se ajustaba a un OVRP con restricción de capacidad. Se presentaron sus algoritmos, así como la estructura de costos del problema real. Se obtuvieron dos soluciones pseudo óptimas, una por cada heurística. La obtenida por el algoritmo NN fue la solución que presentó una reducción de costos mayor frente a la obtenida con el modificado.

Los algoritmos desarrollados funcionan muy bien con los datos suministrados lográndose una disminución de los costos totales de transporte, ofreciendo una muy buena solución con un mínimo esfuerzo computacional, por lo que esta investigación es una herramienta práctica para la toma de decisiones en lo que respecta al enrutamiento diario de los vehículos que brindan el servicio a la institución prestadora de salud (IPS).

Se recomienda para futuros trabajos la implementación de otros algoritmos heurísticos de construcción para posibilitar una reducción mayor en los costos, las distancias recorridas, y el número de vehículos de la flota. ≡

#### Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

#### Referencias bibliográficas

- AKSEN, Deniz; ÖZYURT, Zeynet; ARAS, Necati. Open vehicle routing problem with driver nodes and time deadlines. *In: Journal of the Operational Research Society*. 2007, vol. 58, no.9, p. 1223-1234. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602249>
- ASHOURI, Maryam; YOUSEFIKHOSHBAKHT, Majid. A combination of meta-heuristic and heuristic algorithms for the VRP, OVRP and VRP with simultaneous pickup and delivery. *In: BRAIN. Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience*, 2017, vol. 8, no.2, p.81-95. Disponible en <http://www.edusoft.ro/brain/index.php/brain/article/view/691>
- ATEFI, Reza; SALARI, Majid; COELHO, Leandro; RENAUD, Jacques. The open vehicle routing problem with decoupling points. *In: European Journal of Operational Research*, 2018, vol. 265, no.1, p. 316-327. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.07.033>
- BAUER, Joanna; LYSGAARD, Jens. The offshore wind farm array cable layout problem: a planar open vehicle routing problem. *In: Journal of the Operational Research Society*, 2015, vol. 66, no. 3, p. 360-368. <https://doi.org/10.1057/jors.2013.188>
- BEKTAS, Tolga; ELMASTAS, Seda. Solving school bus routing problems through integer programming. *In: Journal of the Operational Research Society*, 2007, vol. 58, no.12, p.1599-1604. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602305>
- BEN ATKINSON, J. A vehicle-scheduling system for delivering school meals. *In: Journal of the Operational Research Society*, 1990, vol. 41, no 8, p. 703-711. Disponible en <https://link.springer.com/article/10.1057/jors.1990.99>
- CAO, Erbao; LAI, Mingyong. The open vehicle routing problem with fuzzy demands. *In: Expert Systems with Applications*, 2010, vol. 37, no. 3, p.2405-2411. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.07.021>
- CAO, Erbao; LAI, Mingyong; YANG, Hongming. Open vehicle routing problem with demand uncertainty and its robust strategies. *In: Expert Systems with Applications*, 2014, vol. 41, no. 7, p. 3569-3575. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.11.004>
- CHEN, Ping; DONG, Xingye; XIAO, Jianhua. Study on split delivery open vehicle routing problem within two splits. *In: Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD)*, 2016 12th International Conference on, IEEE, 2016, p.724-728. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2016.7603264>
- CLARKE, Geoff; WRIGHT, J.W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *In: Operations research*, 1964, vol. 12, no. 4, p. 568-581. <https://doi.org/10.1287/opre.12.4.568>
- DANTZIG, George; FULKERSON, Delbert; JOHNSON, Selmer. Solution of a large-scale traveling salesman problem. *In: Journal of the operations research society of America*, 1954, vol. 2, no. 4, p.393-410. <https://doi.org/10.1287/opre.2.4.393>
- DANTZIG, George; RAMSER, John. The truck-dispatching problem. *In: Management Science*, 1959, vol. 6, no. 1, p. 80-91. <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>
- DERIGS, Ulrich; REUTER, K.A simple and efficient tabu search heuristic for solving the open vehicle routing problem. *In: Journal of the Operational Research Society*. 2009, vol. 60, no.12, p.1658-1669. <https://doi.org/10.1057/jors.2008.107>
- EPPEN, Gary D. Investigación de operaciones en la ciencia administrativa: construcción de modelos para la toma de decisiones con hojas de cálculo electrónicas. Pearson Educación, 2000.
- FENGHUA, Duan; XIAONIAN, He. On open vehicle routing problem with soft time windows and tabu search. *In: Logistics Research and Practice in China-Proceedings of 2008*. Disponible en <https://pdfs.semanticscholar.org/0b6a/d9937b37c64c8fd6ebad49d1bb90d1b82961.pdf>
- FU, Zhuo; WRIGHT, Mike. Train plan model for British rail freight services through the channel tunnel. *In: Journal of the Operational Research Society*. 1994, vol. 45, no.4, p.384-391. Disponible en <https://link.springer.com/article/10.1057/jors.1994.57>
- FU, Zhuo. The capacitated open vehicle routing problem and its tabu search algorithm. *In: Systems Engineering-theory & Practice*. 2004, vol. 3, p.123-128. Disponible en [http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFD-TOTAL-XTLL200403021.htm](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFD-TOTAL-XTLL200403021.htm)
- GE, Bin; HAN, Yue; BIAN, Chen. Hybrid ant colony optimization algorithm for solving the open vehicle routing problem. *In: Journal of Computers*. 2016, vol.27, no.4, p.41-54. <https://doi.org/10.3966/199115592016122704004>
- GE, Hongyi, ZHEN, Tong, JIANG, Yuying, CHE, Yi. An intelligent solution for open vehicle routing problem in grain logistics. *In: Advances in Wireless Networks and Information Systems*. 2010, vol.72 p.389-396. Disponible en [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-14350-2\\_49](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-14350-2_49)
- GUO, Jinling, YU, Shihwei. A hybrid algorithm for open vehicle routing optimization of coal mines material. *In: Applied Mechanics and Mate-*



- rials. 2012, vol.197, p. 455–461. Disponible en <https://www.scientific.net/AMM.197.455>
21. GURPREETSINGH, Er; DHIR, Vijay. Open vehicle routing problem by ant colony optimization. In: International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2014, vol. 5, p. 63-68. Disponible en <https://pdfs.semanticscholar.org/9e57/ac344b3d2f42e6c02b27536d-23cbf40a02e5.pdf>
  22. HEDAR, Abdel; ABDALLAH, Mohammed. Applying tabu search in finding an efficient solution for the OVRP. In: International Journal of Open Problems in Computer Science and Mathematics (IJOPCM) 2014, vol.7, no.4, p.36–51. Disponible en <http://www.i-csr.org/Vol-umes/ijopcm/vol.7.7.4.4.pdf>
  23. HOSSEINABADI, Ali; KARDGAR, Maryam; SHOJAFAR, Mohammad; SHAMSHIRBAND, Shahab; ABRAHAM, Ajith. Gravitational search algorithm to solve open vehicle routing problem. In: Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications. 2016, p. 93–103. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-28031-8\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-28031-8_8)
  24. HOSSEINABADI, Ali; VAHIDI, Javad; BALAS, Valentina; MIRKAMALI, Seyed. OVRP\_GELS: solving open vehicle routing problem using the gravitational emulation local search algorithm. In: Neural Computing and Applications. 2016, p.1–14. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2608-x>
  25. HU, Fengjun; WU, Fan. Diploid hybrid particle swarm optimization with differential evolution for open vehicle routing problem. In: Intelligent Control and Automation 2010. p. 2692–2697. <https://doi.org/10.1109/WCICA.2010.5554989>
  26. JINHUI, Ge; YING, Xiong; HONGZHEN, Wang. An improved TS for the open vehicle routing problem with soft time windows. In: Computational Intelligence and Design, 2012. p.382–385. <https://doi.org/10.1109/ISCID.2012.102>
  27. KRITZINGER, Stefanie; DOERNER, Karl; TRICOIRE, Fabien; HARTL, Richard. Adaptive search techniques for problems in vehicle routing, Part II: A numerical comparison. In: Yugoslav Journal of Operations Research. 2016, vol. 25.no.2, p. 3-31. Disponible en <http://yujor.fon.bg.ac.rs/index.php/yujor/article/view/453>
  28. LABADIE, Nacima; PRINS, Christian; PRODHON, Caroline. Meta-heuristics for Vehicle Routing Problems. John Wiley & Sons. 2016.
  29. LALLA-RUIZ, Eduardo, *et al.* An improved formulation for the multi-depot open vehicle routing problem. In: OR spectrum. 2016, vol.38, no.1, p.175–187. <https://doi.org/10.1007/s00291-015-0408-9>
  30. LALLA-RUIZ, Eduardo; VOß, Stefan. A note on a hybrid genetic algorithm for the multi-depot open vehicle routing problem. 2016. Disponible en <https://www.bwl.uni-hamburg.de/iwi/forschung/projekte/papernote.pdf>
  31. LETCHFORD, Adam; LYSGAARD, Jens; EGGLESE, Richard. A branch-and-cut algorithm for the capacitated open vehicle routing problem. In: Journal of the Operational Research Society. 2007, vol. 58, no.12, p.1642–1651. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602345>
  32. LI, Leon; FU, Zhuo. The school bus routing problem: a case study. In: Journal of the Operational Research Society. 2002, vol. 53, no.5, p. 552–558. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601341>
  33. LI, Feiyue; GOLDEN, Bruce; WASIL, Edward. The open vehicle routing problem: Algorithms, large-scale test problems, and computational results. In: Computers & operations research. 2007, vol. 34, no.10, p.2918–2930. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.11.018>
  34. LI, Xiang; LEUNG, Stephen; TIAN, Peng. A multistart adaptive memory-based tabu search algorithm for the heterogeneous fixed fleet open vehicle routing problem. In: Expert Systems with Applications. 2012, vol.39, no.1, p.365–374. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.07.025>
  35. LIU, Ran; JIANG, Zhibin; GENG, Na. Erratum to: A hybrid genetic algorithm for the multi-depot open vehicle routing problem. In: OR Spectrum. 2014, vol. 36, no.2, p. 423–424. <http://dx.doi.org/10.1007/s00291-012-0289-0>
  36. LIU, Ran; JIANG, Zhibin; GENG, Na. A hybrid genetic algorithm for the multi-depot open vehicle routing problem. In: OR spectrum. 2014, vol.36, no.2, p.401–421. <http://dx.doi.org/10.1007/s00291-013-0346-3>
  37. LÓPEZ-SÁNCHEZ, Ana, *et al.* A multi-start algorithm for a balanced real-world open vehicle routing problem. In: European Journal of Operational Research. 2014, vol. 238, no.1, p.104–113. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.04.008>
  38. MARINAKIS, Yannis; MARINAKI, Magdalene. Bumble bees mating optimization algorithm for the vehicle routing problem. In: Handbook of Swarm Intelligence. 2011, p. 347–369. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-17390-5\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-642-17390-5_15)
  39. MARINAKIS, Yannis; MARINAKI, Magdalene. A honey bees mating optimization algorithm for the open vehicle routing problem. In: Proceedings of the 13th annual conference on Genetic and evolutionary computation. 2011, p. 101–108. <https://doi.org/10.1145/2001576.2001591>
  40. MIRHASSANI, S.A; ABOLGHASEMI, N. A particle swarm optimization algorithm for open vehicle routing problem. In: Expert Systems with Applications. 2011, vol.38, no.9, p. 11547–11551. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.03.032>
  41. NADERIPOUR, Mansoureh; ALINAGHIAN, Mahdi. Measurement, evaluation and minimization of CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and CO emissions in the open time dependent vehicle routing problem. In: Measurement. 2016, vol.90, p. 443–452. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.04.043>
  42. NOROUZI, Narges, *et al.* A new multi-objective competitive open vehicle routing problem solved by particle swarm optimization. In: Networks and Spatial Economics. 2012, vol.12, no.4, p.609–633. <https://doi.org/10.1007/s11067-011-9169-4>
  43. ÖZYURT, Zeynep; AKSEN, Deniz; ARAS, Necati. Open vehicle routing problem with time deadlines: Solution methods and an application. In: Operations Research Proceedings 2005. 2006, p. 73–78. [https://doi.org/10.1007/3-540-32539-5\\_12](https://doi.org/10.1007/3-540-32539-5_12)
  44. PAN, Lijun, FU, Z. A clone selection algorithm for the open vehicle routing problem. In: Genetic and Evolutionary Computing, 2009. p. 786–790. <https://doi.org/10.1109/WGEC.2009.174>
  45. PENNA, Puca; SUBRAMANIAN, Anand; OCHI, Luiz. An iterated local search heuristic for open vehicle routing problems. In: Congreso Latino-Iberoamericano de Investigación operativa y Simposio Brasileiro de Pesquisa Operacional. 2012, p. 4504-4514. Disponible en <http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2012.pdf/arq0141.pdf>
  46. PESSOA, Artur; DE ARAGÃO, Marcus; UCHOA, Eduardo. Robust branch-cut-and-price algorithms for vehicle routing problems. In: The vehicle routing problem: Latest advances and new challenges. 2008, vol. 43, p.297–325. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-77778-8\\_14](https://doi.org/10.1007/978-0-387-77778-8_14)
  47. PICHPIBUL, Tantikorn; KAWTUMMACHAI, Ruengsak. A heuristic approach based on clarke-wright algorithm for open vehicle routing problem. In: The Scientific World Journal 2013. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/874349>
  48. PISINGER, David; ROPKE, Stefan. A general heuristic for vehicle routing problems. In: Computers & operations research. 2007, vol.34, no.8, p.2403–2435. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.09.012>
  49. RAFF, Samuel. Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art. In: Computers & Operations Research. 1983, vol.10, no.2, p.195–211. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(83\)90030-8](https://doi.org/10.1016/0305-0548(83)90030-8)
  50. REDİ, A.P.; MAGHFIROH, Meilinda; VINCENT, Yu. An improved variable neighborhood search for the open vehicle routing problem with time windows. In: Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2013. p. 1641-1645. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2013.6962688>

51. REINHOLZ, Andreas; SCHNEIDER, Holger. A hybrid (1+1)-evolutionary strategy for the open vehicle routing problem. In: *Advances in Metaheuristics*. Springer. 2013, p. 127–141. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6322-1\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6322-1_8)
52. REN, Chunyu. Research on single and mixed fleet strategy for open vehicle routing problem. In: *Journal of Software*. 2011, vol. 6, no.10, p. 2076–2081. <https://doi.org/10.4304/jsw.6.10.2076-2081>
53. REPOUSSIS, Panagiotis, *et al.* A web-based decision support system for waste lube oils collection and recycling. In: *European Journal of Operational Research*. 2009b, vol. 195, no.3, p.676–700. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.11.004>
54. REPOUSSIS, Panagiotis, *et al.* A hybrid evolution strategy for the open vehicle routing problem. In: *Computers & Operations Research*. 2010, vol. 37, no.3, p.443–455. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.11.003>
55. REPOUSSIS, Panagiotis; TARANTILIS, Christos; IOANNOU, George. The open vehicle routing problem with time windows. In: *Journal of the Operational Research Society*. 2007, vol. 58, no.3, p.355–367. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602143>
56. RUIZ, Hector; RUIZ, M.; ALCARAZ, M.V. Manuel. Problemas de rutas abiertas de vehículos con restricciones de capacidad heterogéneas. En: *Revista de Difusión Técnica Científica de Instituto Tecnológico de Nogales*. 2016, p. 5-7 Disponible en <http://depiitn.edu.mx/wp-content/uploads/2016/02/Tema-2-Problemas-de-Rutas-Abiertas-de-Vehiculos.pdf>
57. RUSSELL, Robert; CHIANG, Wenchuan; ZEPEDA, David. Integrating multi-product production and distribution in newspaper logistics. In: *Computers & Operations Research*. 2008, vol. 35, no.5, p.1576–1588. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.09.002>
58. RUSSELL, Robert. A constraint programming approach to designing a newspaper distribution system. In: *International Journal of Production Economics*. 2013, vol. 145, no.1, p.132–138. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.01.018>
59. SALARI, Mahid; TOTH, Paolo; TRAMONTANI, Andrea. An ILP improvement procedure for the open vehicle routing problem. In: *Computers & Operations Research*. 2010, vol. 37, no.12, p.2106–2120. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.02.010>
60. SARIKLIS, Dimitrios; POWELL, Susan. A heuristic method for the open vehicle routing problem. In: *Journal of the Operational Research Society*. 2000, vol. 51, no.5, p. 564–573. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600924>
61. SCÁRDUA, Rayane, *et al.* Planejamento do transporte de empregados por uma frota de ônibus fretada por meio de um modelo matemático baseado no open vehicle routing problem (OVRP). En: *TRANSPORTES*. 2016, vol. 24, no.3, p. 20–28. <https://doi.org/10.14295/transportes.v24i3.1089>
62. SCHOPKA, Kristian; KOPFER, Herbert. An adaptive large neighborhood search for the reverse open vehicle routing problem with time windows. In: *Logistics Management*. 2016, p. 243–257. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-20863-3\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-319-20863-3_18)
63. SCHRAGE, Linus. Formulation and structure of more complex/realistic routing and scheduling problems. In: *Networks*. 1981, vol. 11, no.2, p.229–232. <https://doi.org/10.1002/net.3230110212>
64. SEDIGHPOUR, Mohammad, *et al.* Solving the open vehicle routing problem by a hybrid ant colony optimization. In: *Kuwait Journal of Science*. 2014, vol. 41, no.3, p.139-162. Disponible en: <https://journal-skuwait.org/kjs/index.php/KJS/article/view/42/49>
65. SEVKLI, Aise; GÜLER, Bekir. A multi-phase oscillated variable neighbourhood search algorithm for a real-world open vehicle routing problem. In: *Applied Soft Computing*. 2017, vol. 58, p.128–144. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.04.045>
66. SHAMSHIRBAND, Shabad, *et al.* OVRP\_ICA: An imperialist-based optimization algorithm for the open vehicle routing problem. In: *International Conference on Hybrid Artificial Intelligence Systems*, Springer. 2015, p. 221–233. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-19644-2\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-19644-2_19)
67. SIAMAC, Universidad Nacional de Colombia Sede Amazonía, 2010. Tips y trucos de GIS. Disponible en: [www.unal.edu.co/siamac/sig/tips.html](http://www.unal.edu.co/siamac/sig/tips.html)
68. SOTO, Maria; SEVAUX, Marc; ROSSI, André; REINHOLZ, Andreas. Multiple neighborhood search, tabu search and ejection chains for the multi-depot open vehicle routing problem. In: *Computers & Industrial Engineering*. 2017, vol. 107, p.211–222. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.03.022>
69. SUBRAMANIAN, Anand; UCHOA, Eduardo; OCHI, Luiz. A hybrid algorithm for a class of vehicle routing problems. In: *Computers & Operations Research*. 2013, vol. 40, no.10, p. 2519–2531. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.01.013>
70. SYSLO, Marceij M.; DEO, N.; KOWALIK, J. S. *Discrete optimization with pascal programs*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1983
71. TAMBUNAN, Hardi; MAWENGGANG, Herman. Mixed Integer Programming Model for open Vehicle Routing Problem with Fleet and driver Scheduling Considering Delivery and Pick-Up Simultaneously. In: *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*. 2015, vol. 3, no.9, p.5508–5513. Disponible en <https://pdfs.semanticscholar.org/78a4/743d839cb21d3777256b92dd0a95d162d830.pdf>
72. TARANTILIS, Christos, *et al.* Solving the open vehicle routing problem via a single parameter metaheuristic algorithm. In: *Journal of the Operational Research Society*. 2005, vol. 56, no.5, p. 588–596. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601848>
73. TYASNURITA, Raras; ÖZCAN, Ender; JOHN, Robert. Learning heuristic selection using a time delay neural network for open vehicle routing. In: *Evolutionary Computation (CEC)*. 2017, p.1474–1481. <https://doi.org/10.1109/CEC.2017.7969477>
74. VINCENT, F.Yu; JEWpanya, Parida; REDI, AAN Perwira. Open vehicle routing problem with cross-docking. In: *Computers & Industrial Engineering*. 2016, vol. 94, p. 6-17. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.01.018>
75. WANG, Shuxia; XIONG, Ying; WANG, Zengqiang. A Study on the Taboo Search Algorithm for the Open Vehicle Routing Problem with Hard Time Windows. In: *Proceedings of the 2012 International Conference on Computer Application and System Modeling*. 2012. Disponible en <https://www.atlantis-press.com/proceedings/iccasm-12/2568>
76. WANG, Xuping; ZHAN, Hongxin; ZHANG, Jun. Research of Oil Product Secondary Distribution Optimization Based on Collaborative Distribution. In: *Procedia Computer Science*. 2015, vol. 60, p. 1367-1376. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/journal/procedia-computer-science/vol/60/suppl/C?page-size=100&page=2>
77. YANG, Jiao-ping; ZHAO, Hong-xia. Research on multi-enterprise allied open vehicle routing problem and its genetic algorithm. In: *Multimedia Technology (ICMT)*. 2010, p.1-4. <https://doi.org/10.1109/ICMULT.2010.5629841>
78. YILMAZ, Duygu, *et al.* Introducing the MCHF/OVRP/SDMP: Multicapacitated/Heterogeneous Fleet/Open Vehicle Routing Problems with Split Deliveries and Multiproducts. In: *The Scientific World Journal*. 2014, vol. 2014. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/515402>
79. YOUSEFIKHOSHBAKHT, Majid; DIDEHVAR, Farzad; RAHMATI, Farhad; SEDIGHPOUR, M. An effective imperialist competitive algorithm for solving the open vehicle routing problem. In: *Journal of Transportation Research*. 2012, vol. 9, p. 83–95. Disponible en <http://www.sid.ir/En/Journal/ViewPaper.aspx?ID=245327>
80. YOUSEFIKHOSHBAKHT, Majid; DIDEHVAR, Farzad; RAHMATI, Farhad. A mixed integer programming formulation for the hetero-

- geneous fixed fleet open vehicle routing problem. In: Journal of Optimization in Industrial Engineering. 2015, vol. 8, no.18, p.37–46. Disponible en [http://www.qjie.ir/article\\_219\\_ebb2cd520ac0626659d-9b38e3b93b4d1.pdf](http://www.qjie.ir/article_219_ebb2cd520ac0626659d-9b38e3b93b4d1.pdf)
81. YOUSEFIKHOSHBAKHT, Majid; DOLATNEJAD, Azam. A column generation for the heterogeneous fixed fleet open vehicle routing problem. In: International Journal of Production Management and Engineering. 2017, vol.5, p.55–71. <http://dx.doi.org/10.4995/ijpme.2017.5916>
  82. YOUSEFIKHOSHBAKHT, Majid, *et al.* A modified column generation to solve the heterogeneous fixed Fleet open vehicle routing problem. In: Journal of Engineering 2016. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5692792>
  83. YU, Shiwei.; DING, Chang.; ZHU, Ding. A hybrid GA–TS algorithm for open vehicle routing optimization of coal mines material. In: Expert Systems with Applications. 2011, vol. 38, no.8, p. 10568–10573. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.02.108>
  84. ZACHARIADIS, Emmanouil; KIRANOUDIS, Chris. An open vehicle routing problem metaheuristic for examining wide solution neighborhoods. In: Computers & Operations Research. 2010, vol. 37, no.4, p.712–723. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.06.021>
  85. ZHANG, Jingling; ZHAO, Yanwey; PENG, Dianjun; WANG, Wanliang. A hybrid quantum-inspired evolutionary algorithm for open vehicle routing problem. In: Advanced Intelligent Mechatronics. 2009, p.839–844. <https://doi.org/10.1109/AIM.2009.5229905>
  86. ZHAO, Yan; ZHANG, J.L; PENG, D.J. Open vehicle routing problem using quantum evolutionary algorithm. In: Advanced Materials Research. 2010, vol. 102-104, p. 807–812. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.102-104.807>