

Aplicación de la Investigación de Operaciones a la Distribución de Recursos Relacionados con la COVID-19 en Cuba

Operational Research Application to Resources Distribution Related to the COVID-19 in Cuba

Autor(es):

Ms. C. Yoan Martínez-López¹ <https://orcid.org/0000-0002-1950-567X>

Dra. C. Hilda Oquendo² <https://orcid.org/0000-0003-1705-5828>

Dra. C Yaile Caballero¹ <https://orcid.org/0000-0002-6725-5812>

Dr. C Luis Eduardo Guerra-Rodríguez² <https://orcid.org/0000-0002-8329-8193>

Ing. Raudel Junco-Villegas² <https://orcid.org/0000-0001-8957-6869>

Dr. C. Isnel Benítez³ <http://orcid.org/0000-0003-2427-640X>

Dr. C. Ansel Rodríguez⁴ <https://orcid.org/0000-0001-9971-0237>

Dr. C. Julio Madera^{1*} <https://orcid.org/0000-0001-5551-690X>

¹ Departamento de Informática, Facultad de Informática y Ciencias Exactas, Universidad de Camagüey, Cuba. E-mail: {yoan.martinez, yaile.caballero, julio.madera}@reduc.edu.cu

² Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias Aplicadas, Universidad de Camagüey, Cuba. E-mail: {hilda.oquendo, eduardo.guerra, raudel.junco}@reduc.edu.cu

³ Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Aplicadas, Universidad de Camagüey, Cuba. E-mail: isnel.benites@reduc.edu.cu

⁴ Centro de Investigación Científica y de Educación Superior en Ensenada, Nayarit, México. E-mail: ansel@cicese.mx

Autor para la correspondencia: julio.madera@reduc.edu.cu, jmaderaq@gmail.com

RESUMEN

Objetivo: El objetivo de este trabajo es la aplicación del modelo de enrutamiento de vehículos y su solución con algoritmos de optimización para la distribución de insumos relacionados con el servicio asistencial a pacientes aquejados de la COVID-19 en Camagüey - Cuba, en función del perfeccionamiento en la toma de decisiones por los directivos.

Métodos: Se utilizaron los problemas de enrutamiento de vehículos heterogéneos con ventanas de tiempos, combinado con algoritmos de optimización para obtener la solución a la distribución de estos recursos.

Principales resultados: Se experimentaron con un total de 15 modelos para el estudio del comportamiento de los algoritmos aplicados al problema, donde se utilizó la biblioteca CVRP, implementada en Matlab. Se implementaron tres de metaheurísticas: EDA, SA, VNS. A partir de la información modelada se procedió a la solución del problema FSMVRPTW a través de algoritmos EDA y VNS, utilizándose este último por contar con una implementación de código abierto en Excel.

Conclusiones: Los estudios acerca del problema de enrutamiento de vehículos han demostrado su utilidad en diferentes situaciones complejas como las pandemias para optimizar la distribución de recursos. En tiempos de COVID-19, contar con una organización del transporte óptima para distribuir los recursos médicos, es una herramienta vital para la toma de decisiones en la provincia Camagüey, extensible a toda Cuba.

Palabras clave:

Enrutamiento de Vehículos, Investigación de Operaciones, Metaheurísticas, COVID-19, Toma de Decisiones.

ABSTRACT

Objective: The objective of this work is the application of the vehicle routing problem and its solution with optimization algorithms to the distribution of resources related to the COVID-19 treatment in Camagüey, Cuba, allowing decision making by health managers.

Methods: Heterogeneous vehicle routing problems with time windows were used, combined with optimization algorithms to obtain the solution to the distribution of these resources.

Main results: It was experimented with a total of 15 models to study the behavior of the algorithms applied to the problem, using the CVRP library, implemented in MATLAB. Three metaheuristics models were implemented: Estimation of Distributions Algorithms, Simulated Annealing and Variable Neighborhood Search. From the modelled problem, it was proceeded to solve the FSMVRPTW problem using EDA, SA and VNS algorithms, the latter being used because it has an open-source implementation in Excel.

Conclusions: The studies about the vehicle routing problem have demonstrated its usefulness in different complex situations as pandemic, to optimize the distribution of resources. In COVID-19 times, having an optimal transport organization to distribute medical resources is a necessary tool for the decision-making process of the health managers in Camagüey, these results can be extended to the rest of provinces in Cuba.

Keywords:

Vehicle Routing Problem, Operations Research, Metaheuristics, COVID-19, Decision Making.

Introducción

El 2020 inició con una pandemia que sitúa a la humanidad ante grandes retos. La aparición de la enfermedad COVID-19 (Ludvigson,2020), causada por el coronavirus

SARS-CoV-2 ha provocado que todos los países afectados realicen esfuerzos para detener esta pandemia y minimizar los daños de su impacto.

Los coronavirus (CoV) son una familia de virus que pueden causar diversas afecciones, desde el resfriado común hasta enfermedades más graves, como ocurre con el coronavirus causante del síndrome respiratorio de Oriente Medio (MERS-CoV) y el que ocasiona el síndrome respiratorio agudo severo (SRAS-CoV) (Wu, 2020). Los coronavirus se pueden propagar de los animales a las personas (transmisión zoonótica). De acuerdo con estudios exhaustivos al respecto, sabemos que el SRAS-CoV se transmitió de la civeta al ser humano y que se ha producido transmisión del MERS-CoV del dromedario al ser humano. Además, se sabe que hay otros coronavirus que circulan entre animales, que todavía no han infectado al ser humano. Esas infecciones suelen causar fiebre y síntomas respiratorios (tos y disnea o dificultad para respirar). En los casos más graves, pueden causar neumonía, síndrome respiratorio agudo severo, insuficiencia renal e incluso la muerte (Simonnet, 2020).

La enfermedad por coronavirus COVID-19 (del acrónimo inglés Coronavirus Disease 2019) es un padecimiento infeccioso causado por un coronavirus recientemente descubierto (Walach, 2020), también conocida como neumonía por coronavirus. Es una enfermedad infecciosa causada por el virus SARS-CoV-2 y se detectó por primera vez a finales de 2019. Produce síntomas similares a los de la gripe, entre los que se incluyen: fiebre, tos, disnea, mialgia y astenia. Puede producir neumonía, síndrome de dificultad respiratoria aguda, sepsis y shock séptico que puede conducir a la muerte. No

existe tratamiento específico; las medidas terapéuticas principales consisten en aliviar los síntomas y mantener las funciones vitales.

La mayoría de las personas que enferman de la COVID-19 experimentan síntomas de leves a moderados y se recuperan sin tratamiento especial, por lo que deben ser trasladados hacia centros de aislamiento u hospitales para su tratamiento oportuno. Esta es una particularidad del protocolo cubano para el tratamiento de la enfermedad; se trata de identificar la mayor cantidad de contactos y enfermos y aislarlos de la población sana. Al disponer de los centros de aislamiento temporales y hospitales es vital hacer llegar, de manera oportuna, todos los recursos necesarios a los mismos, desde medicamentos hasta insumos médicos y no médicos.

En Cuba la distribución de recursos se realiza por las empresas EMCOMED, EPASES y ENSUME para lo cual cuentan con medios de transporte propios y cuyos recorridos deben ser optimizados para prestar un servicio de calidad; es por ello que una correcta planificación del transporte resulta imprescindible para hacer llegar los recursos requeridos a los pacientes y sospechosos, enfocado en el ahorro y uso eficiente de los medios disponibles (López, 2020; Lozano, 2020).

La planificación de las rutas de transporte (VRP, Vehicle Routing Problem) es uno de los problemas de optimización combinatoria más importantes y ampliamente estudiado, con aplicaciones del mundo real, en la logística de distribución y del transporte (Toth & Vigo, 2002). Esto es significativo para la toma de decisiones por parte de los directivos.

Desde su aparición en 1959 por Dantzig y Ramser, quienes realizaron por primera vez una formulación del problema para una aplicación de distribución de combustible, el estudio de VRP ha generado numerosos trabajos de investigación y se han escrito artículos sobre diversas variantes del problema (Dantzig, 1959).

El objetivo de este problema es minimizar la distancia total recorrida por un conjunto de vehículos ubicados en un almacén central, para satisfacer la demanda de un determinado conjunto de clientes. Cada cliente tiene una demanda conocida y cada vehículo sirve una única ruta durante el período de planificación, esta debe comenzar y finalizar en el almacén central. Este problema es una generalización del Problema del Agente Viajero (TSP, Travelling Salesman Problem). (Hatamlou, 2018)

En la práctica, una flota de vehículos es raramente homogénea, ya que la necesidad de estar presente en diversos segmentos del mercado obliga a las empresas a disponer de vehículos que se adapten a la tipología de la mercancía transportada. De igual modo, el disponer de vehículos con diferentes unidades de carga, permite una mejor adaptación a la demanda (Yepes, 2002). Por este motivo, se ha optado por el estudio de esta variante del problema VRP, en el que el número de vehículos disponible para satisfacer las demandas de los clientes es limitado.

En la literatura se han propuesto diferentes versiones del VRP clásico con el fin de acercarse a los contextos reales de los diferentes problemas planteados (Golden, 1984). Estas variantes son formuladas mediante la incorporación de variables y restricciones adicionales al problema original.

La variante VRP para flotas heterogéneas (HFVRP, Heterogeneous Fleet VRP), aparece cuando los diferentes vehículos que conforman la flota difieren en equipamiento, capacidad, antigüedad, estructura de costos o incluso nivel de emisiones, si estas son consideradas (Golden, 1984).

Los primeros ejemplos del HFVRP se deben a los problemas FSM ("Fleet Size and Mix"), propuestos por (Golden et al.,1984). Dichos autores proponen dos heurísticas, donde la primera de ellas se basa en el algoritmo de ahorros de (Clarke & Wright, 1964), y la segunda utiliza un esquema de ruta gigante (Beasley, 1983); este autor formuló 20 problemas que posteriormente han sido tomados como referencia por muchos autores para la presentación de los resultados de sus algoritmos en flotas heterogéneas.

Otras variantes del HFVRP fueron los problemas con un número limitado de vehículos HVRP, introducidos inicialmente por (Taillard, 1999) que presentó un método heurístico basado en la generación de columnas. Este método comienza con la solución al problema VRP homogéneo para cada tipo de vehículo y utiliza un algoritmo de búsqueda tabú.

Los problemas HFVRP son un caso especial del VRP clásico, por lo tanto pertenecientes igualmente a la categoría de NP-Completo, donde el tiempo de cómputo crece exponencialmente con el tamaño del problema; razón por la cual, varios autores de la literatura proponen heurísticas o metaheurísticas para la resolución de este tipo de problemas, ya que son los métodos adecuados para obtener soluciones de calidad en un tiempo de cálculo razonable (Taillard, 1999)

En la literatura existen numerosas variantes del problema HFVRP, tienen en cuenta si la flota de vehículos es limitada o ilimitada y del tipo de coste considerado, las diversas variantes que se pueden encontrar son las siguientes:

- VRP heterogéneo con flota fija y costes variables dependientes de las rutas (HVRPD).
- VRP heterogéneo con flota fija con costes fijos y variables (HVRPFD).
- VRP heterogéneo con flota ilimitada con costes variables (FSMD).
- VRP heterogéneo con flota ilimitada con costes fijos (FSMF).
- VRP heterogéneo con flota ilimitada con costes fijos y variables (FSMFD).

Por otra parte, a las variantes que consideran restricciones de ventanas de tiempo, se les añade "TW" al acrónimo del problema específico.

Por lo que el objetivo de este trabajo es la aplicación CVRP combinado con algoritmos de optimización en la distribución de recursos médicos para la atención a pacientes hospitalizados y sospechosos de la COVID-19.

Desarrollo

Cuando la suma de las demandas de todos los clientes excede la capacidad del vehículo, aparece la variante del CVRP (Capacited Vehicle Routing Problem) (Baldacci, Battarra, & Vigo, 2008). Al igual que la mayoría de los problemas VRP, el problema CVRP es NP-completo. Esto es así, porque el número de posibles soluciones crece exponencialmente con el número de nodos del grafo (clientes o puntos de paso) y rápidamente sobrepasa las capacidades de cálculo de los ordenadores más potentes.

En el CVRP se considera una flota fija y heterogénea de vehículos que se encuentra estacionada en un almacén central para atender la demanda de los clientes conocidos. El CVRP consiste en el diseño de un conjunto de rutas hamiltonianas de menor coste de tal manera que cada cliente ha de ser visitado una única vez por un único vehículo y todas las rutas de los vehículos han de comenzar y finalizar en el almacén.

El problema CVRP básico trata de determinar los recorridos de k vehículos de capacidad C_k que parte de un origen común y deben pasar por un conjunto de lugares de interés (clientes) para distribuir o recoger mercancías según una demanda d_i , y volver de nuevo al origen de manera que la distancia total recorrida (el coste o el tiempo empleado) por el conjunto de vehículos sea mínima. En el tipo de problema más sencillo no se tiene en cuenta el horario de entrega o recogida en cada lugar de interés (ventanas horarias) (Baldacci, Battarra, & Vigo, 2008).

El problema de enrutamiento de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW, VRP with Time Windows) es la variante que ha recibido la mayor atención en la literatura por la importancia práctica de las ventanas de tiempo o "time windows". Las ventanas de tiempo se producen cuando los clientes requieren que el servicio de entrega o recogida se produzca dentro de una franja horaria especificada, la cual está determinada por una hora temprana y otra tardía de servicio. Igualmente, se puede incluir un límite en el tiempo total de conducción de los vehículos debido a las regulaciones existentes en los contratos de los conductores.

En la bibliografía consultada se hace una distinción entre las ventanas de tiempo duras y suaves. En el caso de ventanas de tiempo duras, si un vehículo llega demasiado

temprano a realizar la entrega, se le permite esperar al cliente hasta que el vehículo esté listo para ser atendido, aunque no se permite llegar más tarde del horario que puede ser atendido. Para el caso de ventanas de tiempo suaves, los horarios de los clientes pueden ser violados a costa de una penalización en la función objetivo.

Problema de Enrutamiento de Vehículos con Flota Heterogénea y Ventanas de Tiempos

El **FSMVRPTW** (Fleet size and mix vehicle routing problem with time-windows) puede definirse como sigue (Baldacci, Battarra, & Vigo, 2008):

- Sea $G = (V, E)$ un grafo dirigido donde $V = N \cup \{0\}$ es el conjunto de nodos (**clientes**) y $E = \{(i, j): i, j \in V\}$ es el conjunto de arcos, donde el nodo 0 denota el **depósito**.
- Para cada arco $(i, j) \in E$, denotaremos con d_{ij} el tiempo mínimo de viajar del nodo i al nodo j .
- Cada cliente $i \in N$ es asociado con una demanda no negativa q_i (por conveniencia en la notación, al depósito se le asigna una demanda $q_0 = 0$).
- Para cargar/descargar la cantidad q_i se necesita un tiempo de servicio s_i y una ventana de tiempo $[a_i, b_i]$.
- El servicio del cliente i , debe comenzar entre a_i y b_i , es decir, en cualquier solución factible el vehículo que atiende al cliente i debe arribar en un instante de tiempo $t \in [a_i, b_i]$, o en un instante de tiempo $t < a_i$, por lo que debe esperar $a_i - t$ unidades de tiempo antes de comenzar el servicio.
- Para simplificar la formulación del problema, se asume que todas las ventanas de tiempo están dentro de un horizonte de tiempo dado (por ejemplo, un día). Notemos que esto implica que $a_i \leq b_i$ para cada cliente $i \in N$.
- Se tiene una flota compuesta por H diferentes tipos de vehículos, donde cada vehículo del tipo h ($h = 1, \dots, H$) tiene una capacidad Q^h y un costo fijo F^h .

El objetivo de FSMVRPTW es determinar la cantidad óptima de vehículos heterogéneos y sus rutas asociadas para minimizar la suma de los costos fijos de los vehículos y de los costos de las rutas sujeto a las siguientes restricciones:

1. Cada ruta comienza y termina en el depósito.
2. Cada ruta es asignada a un solo vehículo.
3. La demanda total de los clientes servidos en una ruta no puede exceder la capacidad del vehículo asignado a dicha ruta.

4. Cada cliente es visitado exactamente una vez y su servicio comienza dentro de su ventana de tiempo.

Sin pérdida de generalidad, se asume que los tipos de vehículos son enumerados en orden no decreciente del valor del costo fijo F^h y que, para cada cliente u , existe (al menos) un tipo de vehículo h tal que $Q^{h'} > Q^h$, de otra manera los vehículos de tipo h' pueden ser eliminados de la instancia, en cualquier solución factible, los vehículos del tipo h' pueden ser reemplazados por vehículos del tipo h sin incrementar el costo de la solución.

Formulación matemática de FSMVRPTW

Definamos el conjunto K de vehículos distintos obtenidos por la definición de n vehículos de tipo h para cada $h \in H$. Para cada $k \in K$, sea \tilde{Q}^k y \tilde{F}^k denotan la capacidad y el costo del vehículo k , respectivamente.

Esta formulación es una generalización de la formulación de tres índices del VRP (Toth & Vigo, 2002). La parte de enrutado del problema es modelada a través de dos conjuntos de variables binarias: (i) las variables x_{ij}^k toman valor 1 sii el arco (i, j) es atravesado por el vehículo k ; (ii) las variables y_i^k toman el valor 1 sii el cliente i es servido por el vehículo k . Para seleccionar un conjunto adecuado de vehículos, se introduce la variable binaria z^k , que toma valor 1 si el vehículo $k \in K$ es utilizado, 0 en caso contrario.

El manejo de las ventanas de tiempo y la duración de las rutas requiere la definición de los siguientes conjuntos de variables: (i) las variables t_i^k indicarán el instante mínimo de tiempo en el que el vehículo k puede arribar a cada nodo $i \in V$; (ii) las variables τ_i para indicar el instante de tiempo mínimo en el que el servicio al cliente i puede comenzar; (iii) las variables π^k para determinar el instante de tiempo en el cual el vehículo k , si se utiliza, comienza su ruta. Obsérvese que, para cada vehículo k , el tiempo de inicio y finalización de su ruta es dado por las variables π^k y t_0^k .

A partir del uso de estas variables y una constante positiva muy grande (se le asigna el valor $\max_{i \in N} \{b_i + s_i\} + \max_{(i,j) \in E} d_{ij}$), el problema **FSMVRPTW** puede formularse como sigue:

$$\min \sum_{k \in K} (\tilde{F}^k z^k + t_0^k - \pi^k) - \sum_{i \in N} s_i \quad (1)$$

Sujeto a:

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

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

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

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

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

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

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

$$t_0^k \geq \pi^k, \quad k \in K \quad (9)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

La restricción (2) propone que cada cliente debe ser visitado exactamente por un vehículo, mientras que la restricción (3) y (4) propone que si el cliente i es visitado por el vehículo k , este debe entrar y salir, respectivamente, del nodo asociado. La desigualdad (5) está relacionada con la restricción de capacidad de cada vehículo $k \in K$, y la desigualdad (6) tiene en cuenta los requerimientos de conectividad de cada ruta.

Las restricciones (7), (10) y (11) definen el instante de tiempo para servir a cada cliente i , e impone las restricciones de las ventanas de tiempos. Por otro lado, la restricción (8) define el instante de tiempo en el cual cada vehículo $k \in K$ comienza su recorrido. Nótese que cuando un vehículo k no es utilizado, las variables π^k y t_0^k no tienen restricciones, pero (9) establece que $t_0^k - \pi^k \geq 0$, y la función objetivo los establecerá en un valor común para cualquier solución óptima.

La gran cantidad de variables en el modelo (2) - (17) y la presencia en las restricciones de valores de M muy grandes, hace imposible (o extremadamente complejo) obtener la solución exacta del problema.

Solución de VRP

Los EDA (Estimation of Distribution Algorithms) son un grupo de algoritmos de EA (Evolutionary Algorithms) que permiten ajustar el modelo a la estructura de un problema determinado, realizados por una estimación de distribuciones de probabilidades a partir de soluciones seleccionadas (Larrañaga, 2003). El modelo es una distribución de probabilidad. Estos algoritmos se basan en sustituir los operadores de cruce y mutación de los algoritmos genéticos por la estimación y posterior muestreo de una distribución de probabilidad, aprendida a partir de los individuos seleccionados de una población (Martínez-López et al., 2016, 2019a, 2019b, 2020).

El SA (Simulated Annealing) (recocido simulado, cristalización simulada o enfriamiento simulado) es un algoritmo de búsqueda metaheurística para problemas de optimización global; el objetivo general de este tipo de algoritmos es encontrar una buena aproximación al valor óptimo de una función en un espacio de búsqueda grande. A este valor óptimo se lo denomina "óptimo global". El nombre e inspiración viene del proceso de recocido del acero y cerámicas, una técnica que consiste en calentar y luego enfriar lentamente el material para variar sus propiedades físicas. El calor causa que los átomos aumenten su energía y puedan así desplazarse de sus posiciones iniciales (un mínimo local de energía); el enfriamiento lento les da mayores probabilidades de recristalizar en configuraciones con menor energía que la inicial (mínimo global). (Van Laarhoven, 1987).

La VNS (Búsqueda de Vecindad Variable), propuesto por (Mladenović & Hansen, 1997), es un método metaheurístico para solucionar un conjunto de problemas de optimización combinatoria. Explora vecindarios distantes de la solución actual, y movimientos de allí a nuevos valores si y solo si hubo mejora a la solución actual. El método de búsqueda local se aplica repetidamente para conseguir soluciones en el vecindario a local óptima. VNS se diseñó para aproximar soluciones de problemas de optimización discreta y continua, está enfocada a solucionar problemas de programación lineal, problemas de programación en enteros, problemas de programación en enteros mixtos y problemas de programación no lineal (Mladenović, 1997)

Resultados experimentales

Para realizar el siguiente experimento se utilizó la biblioteca CVRP (Mostapha, 2015), implementada en MATLAB 19a. y las tres metaheurísticas anteriormente analizadas (EDA, SA, VNS). Se experimentaron con un total de 15 modelos (Cantidad de nodos x Cantidad de recursos disponibles) para el estudio del comportamiento de estos algoritmos aplicados al problema.

Como se puede apreciar en la Tabla 1, las metaheurísticas tienen comportamientos similares en la eficiencia evaluativa para las diferentes configuraciones de los modelos (Cantidad de nodos x Cantidad de recursos disponibles), los cuales convergen a la solución óptima. Tanto los algoritmos VNS, como EDA, sus comportamientos fueron ligeramente superior al SA, aunque la cantidad de las iteraciones para encontrar el óptimo es similar. Estos experimentos permiten analizar el comportamiento de la diferentes metaheurísticas para luego seleccionar cuál utilizar para resolver los diferentes problemas en la toma de decisiones.

Tomando como base el estudio anterior, se seleccionó una herramienta que utiliza la variante VNS (Gunes, 2017), para realizar dos estudios de casos en la provincia de Camagüey, en la toma de decisión por parte de los directivos, en la organización del transporte en tiempos de COVID-19, en la provincia de Camagüey.

Modelo	EDA		SA		VNS	
	Iteración	Valor del costo	Iteración	Valor del costo	Iteración	Valor del costo
8x3	16	220.1634	55	220.1634	21	220.1634
9x2	60	327.7324	75	327.7324	78	327.7324
10x3	164	284.9794	128	284.9794	161	284.9794
12x4	196	206.9034	197	206.9034	196	206.9034
14x4	145	275.5251	150	275.6516	142	275.5648
20x4	240	339.423	293	334.2565	264	354.674
25x5	189	324.9167	285	329.1888	220	325.4408
30x5	543	344.5186	697	349.209	653	366.5209
36x5	660	322.3306	725	321.9128	634	321.9128
40x6	609	356.8877	640	356.743	607	356.743
50x7	520	358.0239	584	357.9469	676	390.385
60x7	1097	378.2754	1081	386.7325	1080	378.2754
70x8	1100	390.6932	1133	383.293	1145	435.001

Tabla 1. Comparación de las tres metaheurísticas analizadas en los problemas de la biblioteca CVRP.

Aplicación del problema FSMVRPTW en la empresa EPASES de Camagüey

A partir de la modelación del problema FSMVRPTW, se procedió a su aplicación en la provincia Camagüey. La mayoría de las empresas que transportan mercancías, relacionadas con la salud pública (EMCOMED, EMSUME y EPASES), cuentan con un almacén central en el municipio de Camagüey. Con salida de dicho almacén, las mercancías son transportadas/distribuidas al resto de los 12 municipios de la provincia. En contacto con algunas de estas empresas se caracterizó el transporte, las mercancías que transportan, los horarios de servicios, etc. Una vez caracterizada la información se procedió a simular una posible carga a distribuir con todos los parámetros para este tipo de problema. Las distancias entre los diferentes municipios de la provincia Camagüey fueron calculadas a partir del servicio de BingMaps de Microsoft. Nótese que las distancias son simétricas por lo que se representa como una matriz triangular.

Caso I

1. La empresa cuenta con una flota de cuatro vehículos, todos del mismo tipo ($H = 1$) y con la misma capacidad ($Q^h = 100$, interpretada como cajas con las mismas dimensiones).
2. Cada viaje de un vehículo tiene un costo fijo de 100 CUP y un costo por km de 10 CUP.
3. Cada vehículo puede recorrer, como máximo, 400 km y los choferes no pueden manejar más de 9 horas.
4. La velocidad promedio de los vehículos es de 50 km/h, la misma se relaciona con la calidad de las carreteras y con las condiciones técnicas de los vehículos.
5. Número de clientes $N = 12$, representa los 12 municipios de la provincia Camagüey.
6. Se tienen las distancias entre los municipios, las que representan el peso en los arcos del grafo.
7. La ventana de tiempo de carga de los vehículos en el almacén central es $[6:00, 8:00]$, indica que los vehículos deben iniciar su carga en ese horario y el tiempo de serviciado del vehículo es de 55 minutos.
8. La ventana de trabajo modelada para los clientes es $[8:00, 16:00]$, indica que todas las descargas de vehículos deben comenzar después de las 8:00 am y antes de las 4:00 pm.
9. El tiempo de descarga de la mercancía en los municipios es la misma para todos e igual a 20 minutos.

Además, se definieron las cantidades de embaces a transportar a cada municipio, o sea, la demanda del municipio.

A partir de la información modelada se procedió a la solución del problema FSMVRPTW a través de un algoritmo VNS (Variable Neighborhood Search), obteniéndose la solución óptima que se muestra en la Figura 1. Obsérvese que la solución presenta cuatro rutas, lo que implica la utilización de cuatro vehículos.

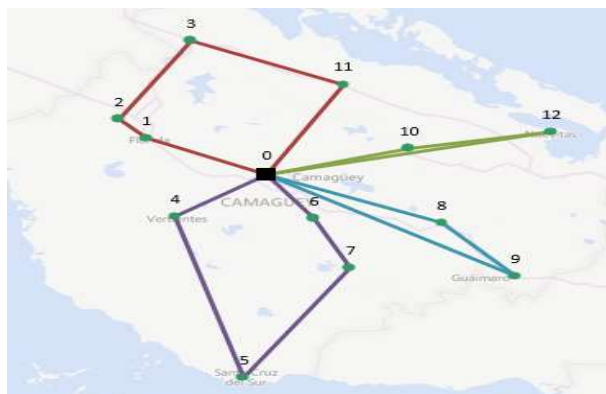


Figura 1. Solución óptima al problema FSMVRTW para la transportación de mercancías relacionadas con la COVID-19 en la provincia de Camagüey.

Todos los vehículos parten del almacén central ubicado en la ciudad de Camagüey. El primer vehículo visita los municipios Sierra de Cubitas, Esmeralda, Céspedes y Florida por ese orden y regresa a la base. Este recorrido se realiza en 2 horas y 43 minutos, con una distancia de 180.6 km. El segundo vehículo visita los municipios de Minas y Nuevitas en un tiempo de 2 horas y 34 minutos, con una distancia de 162.19 km. El tercer vehículo visita Jimaguayú, Najasa, Santa Cruz y Vertientes en un tiempo de 3 horas y 15 minutos, recorre en total 226.25. El último vehículo utilizado recorre los municipios Sibanicú y Guáimaro en un tiempo de 2 horas y 29 minutos, a lo largo de una distancia de 166.29 km.

Caso II

1. La empresa cuenta con una flota de cinco vehículos, todos del mismo tipo ($H = 1$) y con la misma capacidad ($Q^h = 100$, interpretada como cajas con las mismas dimensiones).
2. Cada viaje de un vehículo tiene un costo fijo de 100 CUP y un costo por km de 10 CUP.
3. Cada vehículo puede recorrer, como máximo, 400 km y los choferes no pueden manejar más de 9 horas.
4. La velocidad promedio de los vehículos es de 50 km/h, la misma se relaciona con la calidad de las carreteras y con las condiciones técnicas de los vehículos.
5. Número de clientes $N = 36$, representa los 12 municipios de la provincia Camagüey, los hospitales y centros de aislamiento.
6. Se tienen las distancias entre los municipios, las que representan el peso en los arcos del grafo.

Referencias bibliográficas

- Baldacci, R., Battarra, M., & Vigo, D. (2008). Routing a heterogeneous fleet of vehicles. *The vehicle routing problem: latest advances and new challenges* (pp. 3-27). Boston, MA: Springer.
- Beasley, J. E. (1983). Route first—cluster second methods for vehicle routing. *Omega*, 11(4), 403-408.
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1), 80-91.
- Golden, B., Assad, A., Levy, L., & Gheysens, F. (1984). The fleet size and mix vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 11(1), 49-66.
- Gunes, Erdo ğan, An Open Source Spreadsheet Solver for Vehicle Routing Problems, *Computers and Operations Research* (2017), doi: 10.1016/j.cor.2017.02.022
- Hatamlou, A. (2018). Solving travelling salesman problem using black hole algorithm. *Soft Computing*, 22(24), 8167-8175.
- Larrañaga, P., Lozano, J. A., & Mühlenbein, H. (2003). Algoritmos de estimación de distribuciones en problemas de optimización combinatoria. *Inteligencia Artificial. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 7(19), 0.
- López Boudet, R., González Breto, C., & Campos Hernández, O. (2020). Metodología para el plan de marketing internacional en la exportación de la empresa CubaRon, SA. *Retos de la Dirección*, 14(1), 68-88.
- Lozano Díez, J. A., Marmolejo Saucedo, J. A., & Rodríguez Aguilar, R. (2020). Designing a resilient supply chain: an approach to reduce drug shortages in epidemic outbreaks. *EAI Endorsed Transactions on Pervasive Health*.
- Ludvigson, S. C., Ma, S., & Ng, S. (2020). *Covid19 and the macroeconomic effects of costly disasters* (No. w26987). National Bureau of Economic Research.
- Martínez-López, Y., Rodríguez-González, A. Y., Quintana, J. M., Moya, A., Morgado, B., & Mayedo, M. B. (2019, July). CUMDANCauchy-C1: a cellular EDA designed to solve the energy resource management problem under uncertainty. In

Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion (pp. 13-14).

Martínez-López, Y., Rodríguez-González, A. Y., Quintana, J. M., Mayedo, M. B., Moya, A., & Santiago, O. M. (2020, July). Applying some EDAs and hybrid variants to the ERM problem under uncertainty. In *Proceedings of the 2020 Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion* (pp. 1-2).

Martínez-López, Y., Madera Quintana, J., & Leguen de Varona, I. (2016). Algoritmos evolutivos con estimación de distribución celulares. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 10, 159-170.

Martínez-López, Y., Madera, J., Rodríguez-González, A. Y., & Barigye, S. (2019). Cellular Estimation Gaussian Algorithm for Continuous Domain. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 36(5), 4957-4967.

Mladenović, N., & Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers & operations research*, 24(11), 1097-1100.

Mostapha Kalami Heris, S (2015). Solving Vehicle Routing Problem using Simulated Annealing, <http://www.yarpiz.com>.

Simonnet, A., Chetboun, M., Poissy, J., Raverdy, V., Noulette, J., Duhamel, A., ... & LICORN and the Lille COVID-19 and Obesity study group. (2020). High prevalence of obesity in severe acute respiratory syndrome coronavirus-2 (SARS-CoV-2) requiring invasive mechanical ventilation. *Obesity*.

Taillard, É. D. (1999). A heuristic column generation method for the heterogeneous fleet VRP. *RAIRO-Operations Research-Recherche Opérationnelle*, 33(1), 1-14.

Toth, P., & Vigo, D. (2002). The Vehicle Routing Problem. *Monographs on Discrete Mathematics and Applications*.

Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2002). *The vehicle routing problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics.

Van Laarhoven, P. J., & Aarts, E. H. (1987). Simulated annealing. In *Simulated annealing: Theory and applications* (pp. 7-15). Springer, Dordrecht.

Walach, H., & Hockertz, S. (2020). Wuhan Covid19 data—more questions than answers. *Toxicology*.

Wu, D., Wu, T., Liu, Q., & Yang, Z. (2020). The SARS-CoV-2 outbreak: what we know. *International Journal of Infectious Diseases*.

Yepes, V., & Medina, J. R. (2002). Optimización de rutas con flotas heterogéneas y múltiples usos de vehículos VRPHEMSTW. *Métodos Numéricos en Ingeniería V*, 01-20.

Declaración de contribuciones de los autores:

No	Nombre de los Autores	Tipo de contribución
1	Yoan Martínez-López	Conceptualización, análisis formal, investigación, redacción – borrador original, software.
2	Hilda Oquendo	Análisis formal, investigación, metodología, curación de datos.
3	Yaile Caballero	Investigación, redacción – borrador original
4	Luis Eduardo Guerra-Rodríguez	Curación de datos, investigación, redacción – revisión edición.
5	Raúl Junco-Villegas	Curación de datos.
6	Isnel Benítez	Curación de datos.
7	Ansel Rodríguez	Supervisión, análisis formal, redacción – revisión edición.
8	Julio Madera	Supervisión, conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, redacción - revisión edición, software, administración del proyecto.

Declaración de conflicto de interés y conflictos éticos:

Los autores declaramos que el presente manuscrito es original y no ha sido enviado a otra revista. Los autores somos responsables del contenido recogido en el artículo y en él no existen: ni plagios; ni conflictos de interés; ni éticos.