

OPTIMIZACIÓN DEL RUTEO DE VEHÍCULOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DESECHOS SÓLIDOS MUNICIPALES – CASO CIENFUEGOS

VEHICLE ROUTING OPTIMIZATION FOR MUNICIPAL SOLID WASTE COLLECTION - CASE OF CIENFUEGOS CITY

Ridelio Miranda Pérez¹

E-mail: rmiranda@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5344-9950>

Reginaldo Figueredo Díaz²

E-mail: reginaldo.figueredo@desoft.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8655-7373>

¹Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”. Cuba.

²DESOFTEC, Cienfuegos, Cuba.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Miranda Pérez, R., & Figueredo Díaz, R. (2023). Optimización del ruteo de vehículos para la recolección de desechos sólidos municipales-caso Cienfuegos. *Revista Científica Cultura, Comunicación y Desarrollo*, 8(1), 88-95. <http://rccd.ucf.edu.cu/index.php/rccd>

RESUMEN

La recolección de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Cienfuegos es un servicio a cargo de la Empresa de Servicios Comunes de la municipalidad, encargo de gran importancia social, medio ambiental y económica. Por ello resulta imprescindible que las prácticas que desarrollan las municipalidades para la recolección de estos desechos sean efectivas y eficientes, que permita reducir los costos asociados a esta actividad y alcanzar niveles elevados de servicio. Este trabajo persigue el objetivo de determinar la ruta que minimiza la distancia total a recorrer por los carros recolectores, reduciendo con ello los costos asociados al consumo de combustible y la emisión de gases contaminantes a la atmósfera. Partiendo de la evaluación de la situación actual se formulan los modelos matemáticos de Ruteo de Vehículos por Arcos, y se resuelve luego el problema con el empleo de la programación lineal discreta. Las rutas resultantes permiten reducir la distancia total recorrida por los carros recolectores en un 66% y con ello una reducción del 76% en el consumo de combustibles y más de 8000 Kg de gases contaminantes a la atmósfera, a la vez que se eleva la calidad de los servicios que presta la Empresa de Servicios Comunes.

Palabras clave:

Recolección de desechos sólidos, problema de ruteo de vehículos, problema del cartero chino.

ABSTRACT

Municipal Company of Communal Services of Cienfuegos city is responsible for solid waste collection for environmental, social and economic purposes. Practices of municipalities should be effective and efficient, with the objectives of reducing the total incurred costs in the solid waste collection network concurrently achieving the highest service level. This study aims at finding the best routes of solid waste collection network in Cienfuegos city, Cuba. More specifically, the study seeks the optimal route that minimizes the total travelled distance by the trucks and hence the resulted costs. The current situation is evaluated and the problem is modeled as an Arc Vehicle Routing Problem (PRVA). The PRVA is then optimized by the solution of an integer linear programming model. The calculate routes allows to reduce the trucks total travelled distance by 66% with respect to the actually, with a consequent reduction in 76% the consumption of fuel and more than 8000 kg of gas emissions to the atmosphere, and to elevate the quality of the service of the Municipal Company of Communal Services of Cienfuegos.

Keywords:

Solid waste collection, vehicle routing problem, chinese postman problem.

INTRODUCCIÓN

La producción de los residuos sólidos es inherente al desarrollo de la humanidad (Osorio, 2016). Los niveles crecientes de población, la economía en auge, la rápida urbanización y la mejora de los estándares de vida han acelerado la tasa de generación de residuos sólidos urbanos en los países en desarrollo (Díaz, 2017), los que superan la capacidad de asimilación de los ecosistemas en sus ciclos naturales produciéndose entonces una contaminación ambiental (Alfonso, 1996). La contaminación ambiental por Residuos Sólidos Urbanos (RSU), es uno de los problemas que más afecta a las ciudades, en particular de los países en vías de desarrollo (Pérez et al., 2015). Se estima que para el 2025 la cantidad de RSU generada ascienda a 2.2 billones de toneladas al año. Para los países en vía de desarrollo la generación de los RSU se duplicará para este período y su costo anual escalará de los \$205,4 billones a los \$375,5 billones de dólares para 2025. América Latina y el Caribe es la región más constante en este sentido con 160 millones de toneladas al año (Hornweg & Bhada, 2012).

La tendencia actual en la recolección y tratamiento de RSU está marcada por un incremento sostenido en el reciclaje de los residuos, con una meta de alcanzar basura cero o reciclaje total. Las experiencias en la gestión de RSU definen como el principal eslabón en la cadena su recolección, de los cuales el 80 % de los gastos se concentran en los costos de transporte para su recogida (Fernando-do-Rosario et. al, 2014). Ante esta situación las municipalidades, que generalmente son las entidades responsables de la gestión de residuos en las ciudades, tienen el desafío de ofrecer un sistema efectivo y eficiente de recolección de los RSU.

El tema de la generación de los RSU en Cuba es también un problema en constante crecimiento, dicha afirmación se fundamenta principalmente en el aumento del volumen y su composición con una generación de cuatro mil toneladas de los mismos para un promedio de 0,5 Kg cada día por habitante (Rodríguez, 2019). La provincia de Cienfuegos no escapa a esta situación, con una generación anual aproximada de 998,0 miles m³ de residuos sólidos (ONEI, 2018a). La ciudad de Cienfuegos, ubicada en el centro-sur de la isla de Cuba, no escapa a esta problemática. Con una población residente de 176 244 habitantes (ONEI, 2018b), en ella se concentra la mayor cantidad de industrias y sectores económicos de la provincia del mismo nombre, es el mayor generador de residuos sólidos del territorio con un aproximado de 132 183 Kg/día, presentando un índice de generación de RSU de 0,75 Kg/día por habitante, solo comparable con el de Ciudad de La Habana (Hornweg & Bhada, 2012).

La Empresa de Servicios Comunales del municipio de Cienfuegos (ESCC) es la institución encargada de la recolección, transporte y tratamiento de los residuos que se generan en esta ciudad. Para su recolección, los residuos domiciliarios se depositaban en el frente de los domicilios (siempre en horario nocturno) y la recolección se realizaba una vez por día (siempre en horario de la madrugada). Atendiendo a la cantidad de desechos que se originan, y a su distribución geográfica, la dirección de la empresa ha

dividido su recolección en 13 zonas (Consejos Populares Urbanos), cada una de las cuales es atendida por un carro recolector (ver figura 1).

Los carros recolectores tienen suficiente capacidad para recolectar toda la basura generada en las zonas donde están asignados. Las rutas que siguen los carros recolectores para la recogida de los RSU en cada zona se dejan a criterio de los conductores de los carros, atendiendo a su experiencia. Al finalizar la recogida, los carros recolectores transportan los RSU recolectados hasta el vertedero municipal ubicado en las afueras de la ciudad, parte de los cuales son procesados, y el resto es incinerado.

Como resultado de esta decisión empírica la distancia total recorrida por los carros recolectores es relativamente grande, lo cual incide en el tiempo empleado para la ejecución de los recorridos, el desgaste de los vehículos y la elevación de los costos asociados al consumo de combustible, tema muy sensible para la economía cubana en estos tiempos, y en la emisión de gases contaminantes a la atmósfera. Otra consecuencia de este diseño es que los carros recolectores no siempre realizan el mismo recorrido, por lo que en ocasiones quedan algunas calles de la ciudad sin recolectar, lo cual genera la aparición de micro vertederos y desencadenan una seria problemática higiénico-estética en estos espacios urbanos, provocando molestias, insatisfacción y protestas de los vecinos ante las autoridades de la Empresa de Servicios Comunales.

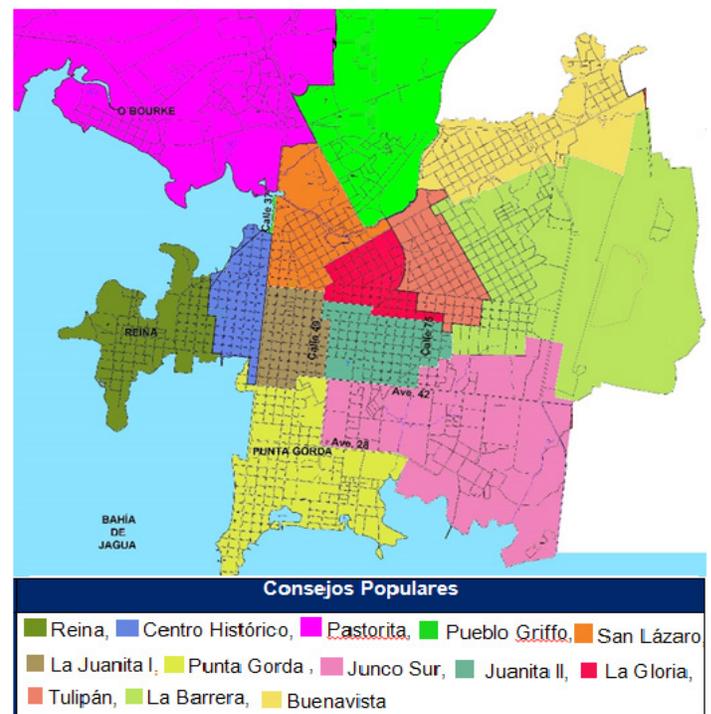


Figura 1: Consejos Populares Urbanos del Municipio Cienfuegos.

Fuente: Dirección Provincial de Planificación Física

La ESCC es responsable, además, por el funcionamiento de otros 8 procesos. En la figura 2 se muestra la distribución por procesos del presupuesto anual de la empresa. Como se puede observar, la recogida de residuos sólidos urbanos es la actividad de mayor peso (26%), en la cual incide fundamentalmente el gasto de combustible (aproximadamente 600 litros de full-oil por día).

A partir de todo lo anterior, se puede concluir que, accionar sobre el municipio Cienfuegos en el diseño de rutas para la recogida de los RSU resultará de vital importancia para el desempeño económico de la ESC, así como para el aseguramiento de la calidad del servicio que esta presta a los habitantes de esta ciudad.

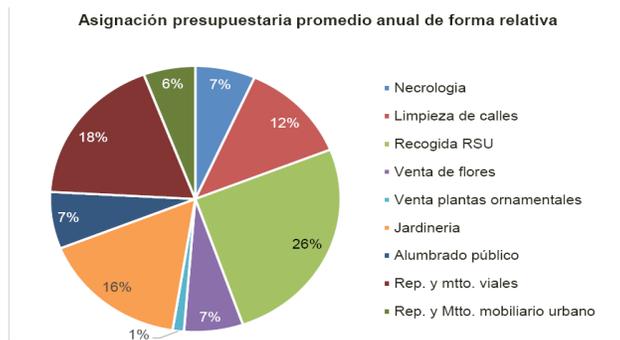


Figura 2: Asignación presupuestaria promedio anual de la Empresa de Servicios Comunales.

Fuente: Empresa de Servicios Comunales Cienfuegos

De esta forma, y el problema a resolver se centró en el diseño de recorridos que permitan disminuir la distancia total recorrida por los carros recolectores, lo cual incidirá directamente en una disminución del consumo de combustible, las horas de trabajo de los empleados y el desgaste de los vehículos encargados de esta actividad, a la vez que se garantiza la recolección en todos los puntos de la ciudad, contribuyendo con ello a elevar la calidad del servicio que se ofrece.

Materiales y métodos

Para el alcance de esta investigación los métodos utilizados son teóricos y empíricos. De los teóricos esencialmente se utilizarán, el histórico-lógico, para la obtención de relaciones características que ocurren en el proceso de planificación de rutas para de los vehículos, y la modelación, con la utilización de modelos de programación matemática para la solución del problema de rutas de vehículos. También se utiliza el analítico-sintético, para descubrir las características generales, las relaciones entre las partes que componen el sistema y en la obtención de las conclusiones finales, y el hipotético-deductivo, en la elaboración y diseño de alternativas posibles a ocurrir en diferentes escenarios.

De los métodos empíricos se utilizarán, la observación, para el estudio descriptivo de las características fundamentales de las rutas de los vehículos de recogida de desechos sólidos en la ciudad de Cienfuegos, y el análisis de documentos, para la revisión de los modelos y métodos aplicables a la temática en cuestión. Se aplican, además, los métodos de la estadística matemática no paramétrica para comprobar la significación de los resultados obtenidos.

Resultados y Discusión

La revisión bibliográfica realizada permitió identificar que el problema planteado clasifica dentro de la clase de problemas denominados como "problemas del diseño de rutas para vehículos", bien estudiado en el campo de la Investigación de Operaciones, y ampliamente utilizados en la práctica para la solución de situaciones semejantes (Vecchi et al, 2016). Dado que en el problema objeto de

estudio, los vehículos están obligados a circular por todas las cuadradas que componen cada zona de recolección asignadas, el problema del diseño de rutas óptimas en este caso se corresponde con una de las variaciones del conocido "Problema del Cartero Chino" (CPP por sus siglas en inglés, *Chinese Postman Problem*) propuesto inicialmente por Kwan Mei-Ko en 1962 (Alfonso, 2014), conocido como el problema del cartero chino rural (RPP - *Rural Postman Problem*).

El CPP (y por ende también el RPP) se basa en la Teoría de Grafos que modela numerosos problemas de diseño y optimización del mundo real. La mayoría de los autores ubica el nacimiento de la Teoría de Grafos en el famoso problema de los siete puentes de Königsberg, planteado por Leonhard Euler en 1736 (Zeng et.al, 2007).

El RPP consiste en construir un circuito que recorra todas las cuadradas de cierta zona en la ciudad, de forma tal que inicie y termine en el mismo punto, y que la distancia total recorrida sea la menor posible, para lo cual se permite, de ser necesario, utilizar algunas calles de zonas vecinas.

Cuando para un problema se tiene que todas sus calles sólo se pueden recorrer en un solo sentido, se dice que el RPP es dirigido. Si, por el contrario, todas las calles son de doble sentido, el RPP clasifica como no dirigido. Dado que en todas las zonas de la ciudad existen calles de doble sentido y calles con un solo sentido de circulación, el problema clasifica como mixto, con lo cual este problema pertenece a la clase NP-duro (Garey & Johnson, 1979). Esto indica que cualquier algoritmo determinístico que pueda resolver este problema tardará un tiempo exponencial en función de sus dimensiones. Por ello, en la mayoría de los casos, es necesario acudir a métodos heurísticos, que no garantizan determinar la solución óptima, pero que permiten encontrar buenas soluciones en un tiempo prefijado.

Existe una gran cantidad de reportes de aplicación de este tipo de problemas, entre ellos, encontrar estrategias de planificación para la prestación de atención de salud en el hogar (Ahmed, 2019), determinar rutas para barredoras de nieve (Holmberg, 2018), rutas para cobradores de Servicio Eléctrico (Ben, 2017), recolección de residuos sólidos en la ciudad de La Habana (Campbell & Allende, 2015). Aunque en todos los casos el problema es, en esencia, el mismo, cada uno de ellos tiene características y restricciones propias que los diferencian. En el caso que nos ocupa, las características del problema descrito, permitan formular el mismo a través de un modelo de programación lineal en enteros.

Para ello, se inicia enumerando todas las esquinas (intersección de dos o más calles) del mapa de cada zona de forma consecutiva, siendo $V = \{1, 2, N\}$ el conjunto de todas las esquinas (Vértices del grafo). Para cualquier conjunto $S \subseteq V$ se diferencian entonces en el grafo las Aristas $E(S; S) = \{i, j \in E: i \in S; j \notin S\}$, como el conjunto de las cuadradas que se pueden recorrer en ambos sentidos, y los Arcos $A(S; S) = \{i, j \in A: i \in S; j \notin S\}$ como las cuadradas que sólo se pueden recorrer en un sentido. Si se asume que (w_{ij}) es la distancia que existe entre las (i) y (j) , se tiene entonces el modelo matemático correspondiente (ver Figura-3),

x_{ij} = Cantidad total de veces que se recorre la arista (i, j)

y_{ij} = Cantidad total de veces que se recorre el arco (i, j)

$$\min \sum_{ij \in E} w_{ij}(x_{ij} + x_{ji}) + \sum_{ij \in A} w_{ij}y_{ij} \quad (1)$$

$$y_{ij} \geq 1 \quad \forall ij \in A_M \quad (2)$$

$$x_{ij} + x_{ji} \geq 1 \quad \forall ij \in E \quad (3)$$

$$s_i + \sum_{j:ji \in E} x_{ji} + \sum_{j:ji \in A} y_{ji} = \sum_{j:ij \in E} x_{ij} + \sum_{j:ij \in A} y_{ij} + t_i \quad \forall i \in I \quad (4)$$

$$\sum_{j:ji \in E} x_{ji} + \sum_{j:ji \in A} y_{ji} = \sum_{j:ij \in E} x_{ij} + \sum_{j:ij \in A} y_{ij} + t_i \quad \forall i \in V \setminus I \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} s_i = 1 \quad (6)$$

$$\sum_{i \in V} t_i = 1 \quad (7)$$

$$\sum_{ij \in E(S,S)} x_{ij} + \sum_{ij \in A(S,S)} y_{ij} \geq 1 \quad \forall S \subset V, S \neq \emptyset \quad (8)$$

$$x_{ij} \in \mathbb{Z}_+ \quad \forall ij \in E \quad (9)$$

$$y_{ij} \in \mathbb{Z}_+ \quad \forall ij \in A \quad (10)$$

$$s_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I \quad (11)$$

$$t_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V \quad (12)$$

Figura 3: Modelo matemático para el problema del cartero chino rural correspondiente. Fuente: Elaboración propia

La función objetivo (1) permite minimizar la distancia total de la ruta de recolección, es decir, la suma de las distancias individuales de las cuadras recorridas por el vehículo. Las restricciones (2) solicitan que cada arco sea visitado al menos una vez, mientras que las restricciones (3) requieren que cada arista sea visitada al menos una vez en alguna de las dos direcciones. Las restricciones (4)-(5) aseguran que la solución es un camino, imponiendo la conservación de flujo en cada vértice con excepción de los vértices de inicio (s_i) y final (t_i) del recorrido. Las restricciones (6) y (7) garantizan que estos dos vértices son únicos, mientras que las restricciones (8) impiden la formación de subciclos.

Tomando en cuenta que las zonas preestablecidas por (ESCC) generan problemas con dimensiones consideradas pequeñas y/o medianas, se ha diseñado un procedimiento de solución que combina un algoritmo determinístico del tipo Ramificación-Acotación (Taha, 2012) con el algoritmo de Hierholzer (Yordá, 2015). Inicialmente, y empleando el algoritmo de Ramificación-Acotación, se resuelve el problema (1)-(12), sin considerar (relajando) las restricciones de subciclo de tipo (8). La solución óptima obtenida genera un ciclo (C) que cumple todas las condiciones establecidas, excepto que este puede contener subciclos. A continuación, y con el objetivo de romper los subciclos contenidos en (C), se aplica el algoritmo de Hierholzer.

La aplicación combinada de estos dos algoritmos garantiza la obtención de una ruta óptima para cada una de las zonas, con lo cual reduce al mínimo la distancia total a recorrer por los carros recolectores, dado cumplimiento así al objetivo trazado en este trabajo.

El algoritmo de Hierholzer puede describirse como sigue.

Paso-1: comenzando por el nodo de inicio v_0 se construye un ciclo C_1 , concatenando, uno por uno, los arcos adyacentes a v_0 , y se eliminan los arcos ya seleccionados de la red, hasta que el ciclo termine (en el nodo v_0). Si con al concluir se han seleccionados todos los arcos de la red, el

algoritmo concluye, y el ciclo solución será $C = C_1$. En caso contrario seguir al paso-2.

Paso-2: tomamos como nodo inicial cualquier nodo (v) que esté en el ciclo C_1 que todavía tenga aristas incidentes sin eliminar, y se construye un ciclo C_2 que comience en dicho nodo.

Paso-3: seleccionar dos arcos $a_1; a_2 \in C_1$ incidentes en el nodo (v), e insertamos el ciclo C_2 entre ellos, con lo cual quedan fusionados los dos ciclos, renombrando al ciclo resultante como C_1 .

Paso-4: si todos los arcos de la red han sido eliminados, se da por concluido el algoritmo, y el ciclo resultante será: $C = C_1$., en caso contrario volver al paso 2.

La implementación del procedimiento propuesto consiste de dos componentes fundamentales: el algoritmo de Ramificación-Acotación y el algoritmo de Hierholzer.

La ejecución del algoritmo de Ramificación-Acotación se realiza con el empleo del software **IBM ILOG CPLEX Optimization Studio** (versión 12). Para la ejecución del algoritmo de Hierholzer se desarrolló la aplicación (Hierholzer-ALG) codificado por los autores sobre Python3. La ejecución de ambos algoritmos se realizó en un procesador Intel(R) Core (TM) i3-3110M a 2.40 GHz con 2.00 GB de memoria RAM, bajo el sistema operativo Windows-10.

A continuación se ilustra la aplicación del procedimiento en el Consejo Popular "Casco Histórico", que por su importancia histórica y social, fue declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO.

Previo a la aplicación del procedimiento se escanea el mapa del Consejo Popular con la ayuda de la aplicación para móviles OsmAnd+, y se enumeran todas las esquinas del mismo (nodos), tal y como se muestra en la figura-4. Este Consejo Popular abarca un perímetro aproximado de 5000 m, en el cual se ubican 63 manzanas y 48 calles orientadas. De esta suerte, el grafo asociado al mismo es de tipo mixto, con 72 nodos o esquinas, 48 arcos y 102 aristas ($V=72, A=48, E=102$).

A continuación, se calculan las distancias entre cada uno de los nodos por medio de OsmAnd+, software desarrollado bajo la tecnología del **Open Street Map Odbi** para dispositivos móviles en su versión 2.5.4, creando de esta forma la matriz de distancias, la cual se guarda en formato .xls con la ayuda de la aplicación Excel.

Luego se formula el modelo de programación lineal en enteros (1-12 sin incluir la restricción 8) correspondiente a esta zona empleando para ello las facilidades que brinda CPLEX (ver Tabla 1). El programa se encarga entonces de procesar el modelo, vinculado este a los datos contenidos en la matriz de distancias, y como resultado genera entonces una nueva hoja de Excel con la solución óptima, a partir de la cual se puede construir, aplicando el algoritmo de Hierholzer, que reenumera los nodos del mapa en función del recorrido óptimo a realizar por los carros recolectores.

En el caso del Consejo Popular "Casco Histórico", el recorrido obtenido, atendiendo a la numeración de los nodos preestablecida en la figura 4, es el siguiente.

1-4-7-11-16-21-28-29-30-31-32-33-26-25-32-33-34-27-26-33-34-41-40-39-38-45-52-53-46-47-48-53-58-63-62-57-56-51-50-49-42-35-42-43-50-49-54-55-50-55-54-59-64-65-60-55-56-61-60-59-64-68-70-72-71-69-68-70-71-69-65-66-67-66-61-62-67-63-58-57-52-51-44-37-36-43-44-45-46-47-40-33-34-41-48-46-39-38-31-32-39-38-37-30-31-24-19-20-15-20-25-24-23-22-29-36-35-28-29-30-23-18-19-14-10-6-9-10-15-14-13-12-17-22-21-16-17-18-13-9-8-7-11-12-8-5-63-2-1-4-5-2-1, cuyo mapa, después de reorganizar la numeración de los nodos según el orden en que deben recorrerse, se puede observar en la figura 5.

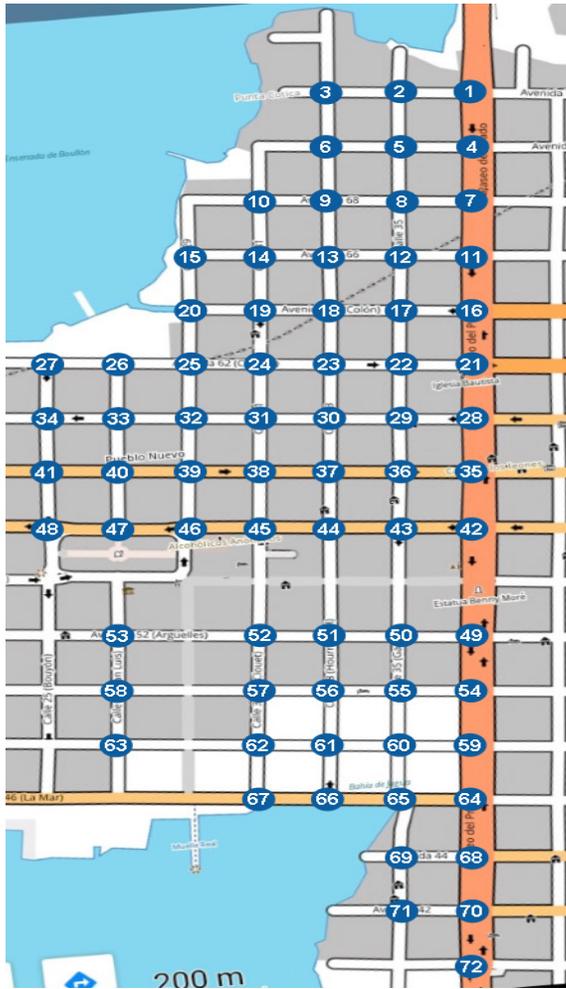


Figura 4: Mapa del Consejo Popular "Casco Histórico" con sus nodos. Fuente: OsmAnd

Tabla 1. Modelo CPLEX PLE correspondiente al Consejo Popular "Casco Histórico"

<pre> ***** * OPL 12.6.1.0 Model Casco Historico * Author: Reginaldo Figueredo Diaz * Creation Date: 15/02/2020 at 14:20 *****/ //Definiendo Variables int norigen=...; int ndestino=...; range origen=1..norigen; range destino=1..ndestino; float costo[origen][destino]=...; dvar int+ x[origen][destino]; dexpr float costototal = sum(u in origen, c in destino) costo[u][c]*x[u][c]; //Funcion Objetivo minimize costototal; //Restricciones subject to { x[1][2]+x[2][1]>=1; x[1][4]+x[4][1]>=1; x[2][5]+x[5][2]>=1; x[2][3]+x[3][2]>=1; x[3][6]+x[6][3]>=1; x[4][5]+x[5][4]>=1; x[4][7]+x[7][4]>=1; x[5][6]+x[6][5]>=1; x[5][8]+x[8][5]>=1; x[6][9]+x[9][6]>=1; x[6][10]+x[10][6]>=1; x[7][8]+x[8][7]>=1; x[7][11]+x[11][7]>=1; x[8][9]+x[9][8]>=1; x[8][12]+x[12][8]>=1; x[9][10]+x[10][9]>=1; x[9][13]+x[13][9]>=1; x[10][14]+x[14][10]>=1; x[10][15]+x[15][10]>=1; x[11][12]+x[12][11]>=1; x[11][16]+x[16][11]>=1; x[12][13]+x[13][12]>=1; x[12][17]+x[17][12]>=1; x[13][14]+x[14][13]>=1; x[13][18]+x[18][13]>=1; x[14][15]+x[15][14]>=1; x[14][19]+x[19][14]>=1; x[15][20]+x[20][15]>=1; x[16][17]+x[17][16]>=1; x[16][21]+x[21][16]>=1; </pre>	<pre> x[17][18]+x[18][17]>=1; x[17][22]+x[22][17]>=1; x[18][19]+x[19][18]>=1; x[18][23]+x[23][18]>=1; x[19][20]+x[20][19]>=1; x[19][24]+x[24][19]>=1; x[20][25]+x[25][20]>=1; x[21][22]+x[22][21]>=1; x[21][28]+x[28][21]>=1; x[22][23]+x[23][22]>=1; x[22][29]+x[29][22]>=1; x[23][24]+x[24][23]>=1; x[23][30]+x[30][23]>=1; x[24][25]+x[25][24]>=1; x[24][31]+x[31][24]>=1; x[25][26]+x[26][25]>=1; x[25][32]+x[32][25]>=1; x[26][27]+x[27][26]>=1; x[26][33]+x[33][26]>=1; x[27][34]+x[34][27]>=1; x[28][29]+x[29][28]>=1; x[29][30]+x[30][29]>=1; x[29][36]+x[36][29]>=1; x[30][31]+x[31][30]>=1; x[30][37]+x[37][30]>=1; x[31][32]+x[32][31]>=1; x[31][38]+x[38][31]>=1; x[32][33]+x[33][32]>=1; x[32][39]+x[39][32]>=1; x[33][34]+x[34][33]>=1; x[33][40]+x[40][33]>=1; x[34][41]+x[41][34]>=1; x[35][36]+x[36][35]>=1; x[35][42]+x[42][35]>=1; x[36][37]+x[37][36]>=1; x[36][43]+x[43][36]>=1; x[37][38]+x[38][37]>=1; x[37][44]+x[44][37]>=1; x[38][39]+x[39][38]>=1; x[38][45]+x[45][38]>=1; x[39][40]+x[40][39]>=1; x[39][46]+x[46][39]>=1; x[40][41]+x[41][40]>=1; x[40][47]+x[47][40]>=1; x[41][48]+x[48][41]>=1; x[42][43]+x[43][42]>=1; x[42][49]+x[49][42]>=1; x[43][44]+x[44][43]>=1; x[43][50]+x[50][43]>=1; x[44][45]+x[45][44]>=1; x[44][55]+x[55][44]>=1; x[44][59]+x[59][44]>=1; x[45][60]+x[60][45]>=1; x[45][64]+x[64][45]>=1; x[46][61]+x[61][46]>=1; x[46][65]+x[65][46]>=1; x[47][62]+x[62][47]>=1; x[47][66]+x[66][47]>=1; x[48][63]+x[63][48]>=1; x[48][67]+x[67][48]>=1; x[49][64]+x[64][49]>=1; x[49][68]+x[68][49]>=1; x[50][65]+x[65][50]>=1; x[50][69]+x[69][50]>=1; x[51][66]+x[66][51]>=1; x[51][70]+x[70][51]>=1; x[52][67]+x[67][52]>=1; x[52][71]+x[71][52]>=1; x[53][68]+x[68][53]>=1; x[53][72]+x[72][53]>=1; x[54][69]+x[69][54]>=1; x[54][73]+x[73][54]>=1; x[55][70]+x[70][55]>=1; x[55][74]+x[74][55]>=1; x[56][71]+x[71][56]>=1; x[56][75]+x[75][56]>=1; x[57][72]+x[72][57]>=1; x[57][76]+x[76][57]>=1; x[58][73]+x[73][58]>=1; x[58][77]+x[77][58]>=1; x[59][74]+x[74][59]>=1; x[59][78]+x[78][59]>=1; x[60][75]+x[75][60]>=1; x[60][79]+x[79][60]>=1; x[61][76]+x[76][61]>=1; x[61][80]+x[80][61]>=1; x[62][77]+x[77][62]>=1; x[62][81]+x[81][62]>=1; x[63][78]+x[78][63]>=1; x[63][82]+x[82][63]>=1; x[64][79]+x[79][64]>=1; x[64][83]+x[83][64]>=1; x[65][80]+x[80][65]>=1; x[65][84]+x[84][65]>=1; x[66][81]+x[81][66]>=1; x[66][85]+x[85][66]>=1; x[67][82]+x[82][67]>=1; x[67][86]+x[86][67]>=1; x[68][83]+x[83][68]>=1; x[68][87]+x[87][68]>=1; x[69][84]+x[84][69]>=1; x[69][88]+x[88][69]>=1; x[70][85]+x[85][70]>=1; x[70][89]+x[89][70]>=1; x[71][86]+x[86][71]>=1; x[71][90]+x[90][71]>=1; x[72][87]+x[87][72]>=1; x[72][91]+x[91][72]>=1; </pre>	<pre> x[44][51]+x[51][44]>=1; x[45]>=1; x[46]+x[46][45]>=1; x[45][52]+x[52][45]>=1; x[46]>=1; x[47]+x[47][46]>=1; x[46][53]+x[53][46]>=1; x[47][48]+x[48][47]>=1; x[48][53]+x[53][48]>=1; x[49]>=1; x[50][49]>=1; x[49][54]+x[54][49]>=1; x[50]>=1; x[51]+x[51][50]>=1; x[50][55]+x[55][50]>=1; x[51]>=1; x[52]+x[52][51]>=1; x[51][56]+x[56][51]>=1; x[52]>=1; x[53]+x[53][52]>=1; x[52][57]+x[57][52]>=1; x[53]>=1; x[54]+x[54][53]>=1; x[53][58]+x[58][53]>=1; x[54]>=1; x[55][54]>=1; x[55][59]>=1; x[56]+x[56][55]>=1; x[55][60]+x[60][55]>=1; x[56]>=1; x[57]+x[57][56]>=1; x[56][61]+x[61][56]>=1; x[57][58]+x[58][57]>=1; x[57]>=1; x[58]+x[58][57]>=1; x[57][62]+x[62][57]>=1; x[58][63]+x[63][58]>=1; x[59]>=1; x[60]+x[60][59]>=1; x[59][64]+x[64][59]>=1; x[60][65]+x[65][60]>=1; x[61]>=1; x[62]+x[62][61]>=1; x[61][66]+x[66][61]>=1; x[62]>=1; x[63]+x[63][62]>=1; x[62][67]+x[67][62]>=1; x[63]>=1; x[64]+x[64][63]>=1; x[63][68]+x[68][63]>=1; x[64]>=1; x[65]+x[65][64]>=1; x[64][69]+x[69][64]>=1; x[65][70]+x[70][65]>=1; x[66]>=1; x[67]+x[67][66]>=1; x[66][71]+x[71][66]>=1; x[67]>=1; x[68]+x[68][67]>=1; x[67][72]+x[72][67]>=1; x[68]>=1; x[69]+x[69][68]>=1; x[68][73]+x[73][68]>=1; x[69]>=1; x[70]+x[70][69]>=1; x[69][74]+x[74][69]>=1; x[70]>=1; x[71]+x[71][70]>=1; x[70][75]+x[75][70]>=1; x[71]>=1; x[72]+x[72][71]>=1; x[71][76]+x[76][71]>=1; </pre>
---	--	--

El valor óptimo (mínimo) de la función objetivo (que mide la distancia total a recorrer) calculado para esta solución es 17.4, o sea, 17.4 kilómetros (Km), resultado que también ofrece el software utilizado. Si a este valor se le adicionan los 7.5 Km de recorrido al vertedero (3.75 km de ida y 3.75 km de vuelta), se obtiene entonces un total de 24.9 Km a

recorrer por este vehículo. En base a este cálculo, y tomando en cuenta el índice de consumo de 4 Km/l que considera la empresa, se tiene entonces que el carro recolector necesita un total de 6.2 litros de combustible para cubrir todo el recorrido.

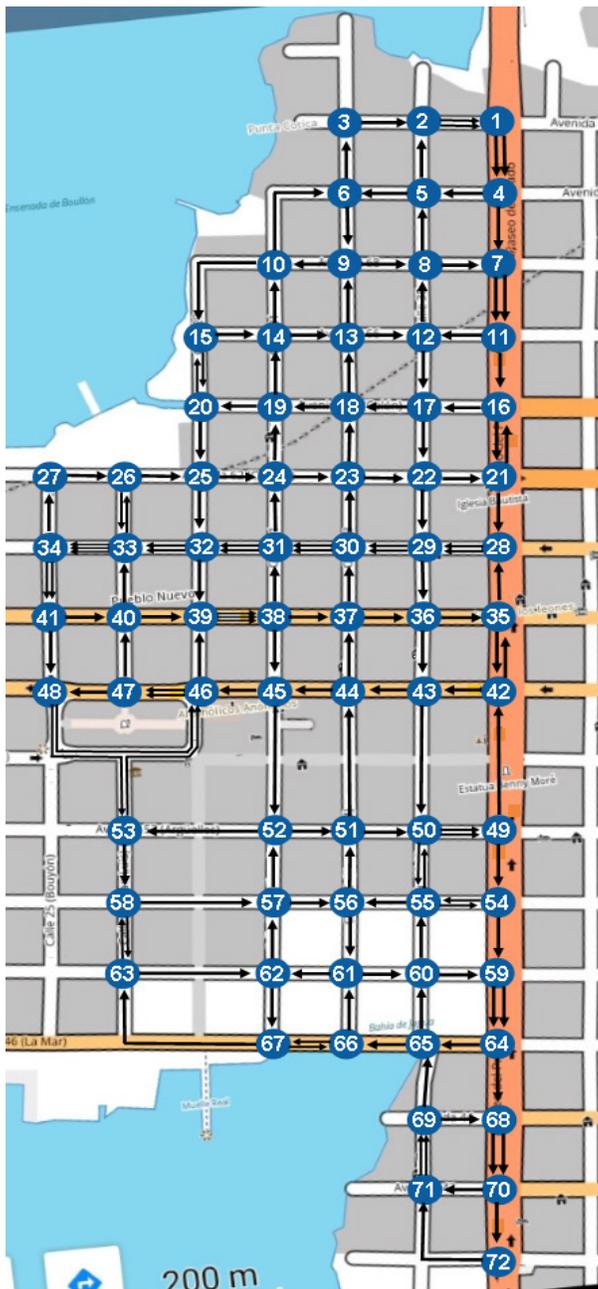


Tabla 2. Comparación de las distancias a recorrer según plan actual y plan propuesto

Fuente: Elaboración propia

Consejos Populares	Distancia Total según recorrido actual (Km)	Distancia Total según recorrido óptimo (Km)
Reina	75.00	24.00
Punta Gorda	240.00	41.00
Centro Histórico	160.00	24.90
La Gloria	124.00	25.10
Juanita I	220.00	30.30
Juanita II	75.00	24.70

San Lázaro	50.00	21.20
Pastorita Obourque	80.00	14.40
Pueblo Grippo	50.00	15.00
Buena Vista	62.50	23.60
La Barrera	87.50	30.50
Tulipán	120.00	27.50
Junco Sur	180.00	27.00
Total	1524.00	329.20

Como se puede observar, la solución propuesta implica una disminución considerable en cuanto a la cantidad de kilómetros a recorrer por cada carro recolector en cada una de las zonas establecidas por la ESCC, lo cual conlleva a una disminución en la distancia total a recorrer de aproximadamente 330 Km diarios (ver Tabla 2), que equivale a una disminución de casi 10 000 km al mes y más de 100 000 Km al año, lo cual debe repercutir, además, en una reducción en el desgaste de las piezas de los carros recolectores.

A partir de estos resultados, y tomando en cuenta el índice de consumo que considera la empresa para cada zona, se tienen los resultados que se resumen en la Tabla 3. Aquí se observa, igualmente, que la solución propuesta proporciona un ahorro de aproximadamente 340 litros de combustible diariamente, que equivale a un ahorro mensual superior a los 10 000 litros de combustible, que anualmente significan más de 120 000 litros de combustible que se pueden ahorrar, con la consecuente disminución de los costos (costo por litro).

Adicionalmente, y según (Campbell & Allende, 2015), la combustión de un litro de petróleo genera más de 800 g de CO₂ que si lo multiplicamos por la cantidad de combustible fósil que se ahorra diariamente, si se introducen los recorridos propuestos en este trabajo, se deja de arrojar a la atmósfera 270.32 Kg de CO₂ cada día (más de 8000 Kg mensual y casi 100 000 Kg de CO₂ al año) sólo en la ciudad de Cienfuegos.

Todos los elementos aportados evidencian el impacto económico y ambiental que debe generar la solución propuesta en el desempeño de la Empresa de Servicios Comunales de Cienfuegos. Se debe considerar, asimismo, que estos resultados deben repercutir en una mejor organización del trabajo y en una disminución del tiempo requerido para estas labores, así como en un incremento de la calidad del servicio que se brinda (no debe quedar ninguna calle de la ciudad sin recolectar).

Tabla 3. Comparación del consumo de combustible según plan actual y plan propuesto

Consejos Populares	Índice de Consumo (Km/L)	Asignación (litros)	Consumo óptimo (litros)	Ahorro (litros)
Reina	2.5	30	9.60	20.40
Punta Gorda	4.0	60	10.20	49.80
Centro Histórico	4.0	40	6.20	33.80

La Gloria	4.0	31	6.30	24.70
Juanita I	4.0	55	7.60	47.40
Juanita II	2.5	30	9.90	20.10
San Lázaro	2.5	20	8.50	11.50
Pastorita Obourque	4.0	20	3.60	16.40
Pueblo Griffo	2.5	20	6.00	14.00
Buena Vista	2.5	25	9.40	15.60
La Barrera	2.5	35	12.20	22.80
Tulipán	4.0	30	6.90	23.10
Junco Sur	4.0	45	6.70	38.30
Total		441.00	103.10	337.90

Finalmente, para comprobar si las diferencias entre el recorrido actual y el recorrido óptimo que se propone, son o no significativas, se aplica la prueba de suma de rangos de Wilcoxon para muestras pareadas (Kenneth et al., 2012). Esta prueba (estadística no paramétrica) permite identificar si las muestras comparadas proceden de poblaciones con la misma distribución de probabilidad (hipótesis nula H_0). La hipótesis alternativa (H_1) por su parte, establece que hay diferencias significativas respecto a la tendencia central de las poblaciones: Para ello se utiliza el paquete estadístico SPSS y los datos de la Tabla 2.

Según los resultados obtenidos (Tabla 4) y observando que el valor-P (Sig. asintót. (bilateral) es (0.001), menor que 0.05, entonces se rechaza la hipótesis nula y se concluye que hay evidencias suficientes para plantear que los recorridos óptimos calculados en este trabajo son significativamente inferiores a los recorridos que realizan actualmente los carros para la recolección de los RSU en la ciudad de Cienfuegos con un nivel de significación del 5%.

Por otro lado, se pudo apreciar que los tiempos de ejecución del algoritmo para cada una de las zonas en una PC de escritorio como la empleada son, en promedio 6.34 segundos, y siempre inferiores a los 10 segundos. Estos tiempos insignificantes permiten responder a la dinámica la ciudad, tales como cambios en los sentidos de las calles, vías cerradas por deterioro o por obras constructivas, prohibiciones de circulación, etc., pues se obtienen soluciones casi al instante cada vez que se necesite. Todo ello aporta un valor adicional considerable al procedimiento propuesto en este trabajo.

Tabla 4. Resultados de la prueba de suma de rangos de Wilcoxon para muestras pareadas

Fuente: SPSS

H_0 : No hay diferencias entre las observaciones pareadas

H_1 : Sí hay diferencias entre las observaciones pareadas

Rangos

		N	Rango promedio	Suma de rangos
Camino Optimo-Camino Actual	Rangos negativos	13(a)	7.00	91.00
	Rangos positivos	0(b)	.00	.00
	Empates	0(c)		
	Total	13		

a Camino Optimo < Camino Actual

b Camino Optimo > Camino Actual

c Camino Optimo = Camino Actual

Estadísticos de contraste(b)

	Camino Optimo-Camino Actual
Z	-3.180(a)
Sig. asintót. (bilateral)	.001

a Basado en los rangos positivos.

b Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon

CONCLUSIONES

La utilización de mapas del proyecto *Open Street Map* y herramientas con tecnología GPS permitió obtener la matriz distancia de cada Consejo Popular para poder resolver el problema con una alta confiabilidad.

El empleo del modelo matemático formulado permitió encontrar una solución óptima para el diseño de los recorridos de los carros recolectores de RSU en la ciudad de Cienfuegos.

Los experimentos numéricos realizados confirmaron que la solución calculada recorre la totalidad de las calles de cada Consejo Popular, reduce de manera significativa la distancia total recorrida, el consumo de combustible, y la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, a la vez que contribuye a elevar el nivel de servicio de recogida de la ESCC.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, H. (2019). Graph Routing Problem Using Euler's Theorem and Its Applications. *Engineering Mathematics*, 3(1), 1-5. <http://doi.org/10.11648/j.engmath.20190301.11>
- Alfonso, T. (2014). *Optimización de rutas de recogida de residuos en zonas mixtas urbana-rurales y orografía singular*. Universidad de La Laguna.
- Alfonso, V. (1996). *Los residuos. Residuos sólidos urbanos y política de residuos*. Universidad Autónoma de México.
- Ben, H. (2017). *Vehicle Routing Problems with road-network information*. (Tesis). Université Clermont Auvergne. https://www.researchgate.net/publication/325214704_Vehicle_Routing_Problems_with_road-network_information

- Berry, K.J., Mielke, P.W., & Johnston, J.E. (2012). The Two-sample Rank-sum Test: Early Development. *Electronic Journ@l for History of Probability and Statistics*, 8. <https://www.jehps.net/diciembre2012/BerryMielkeJohnston.pdf>
- Campbell, J. & Allende, S. (2015). *El diseño del recorrido para la recolección de residuos sólidos. Caso de estudio: municipio Plaza de la Revolución*. (Tesis de Grado). Universidad de La Habana.
- Díaz, A. (2017). *Metodología para el cálculo de generación y determinación de la composición física de los residuos sólidos* (RSU). (Tesis de Grado). Universidad de La Habana.
- Fernando-do-Rosario, J.B., Concepción, D.N., Barrios, G., & González, E. (2014). Gestión de los residuos sólidos y sus impactos económicos, sociales y medioambientales. *Revista Centro Azúcar*, 41(4). http://centrozucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/268
- Garey, M. R., & Johnson, D. S. (1979). *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. In M. R. Garey (Ed.). USA. Bell Telephone Laboratories, Incorporate.
- Holmberg, K. (2018). Heuristics for the weighted k-rural postman problem with applications to urban snow removal. *Journal on Vehicle Routing Algorithms*, 1, 105–119. <https://doi.org/10.1007/s41604-018-0008-3>
- Hoornweg, D., & Bhada, P. (2012). *What a waste: a global review of solid waste management*. <https://www.worldbank.org/urban>
- ONEI. (2018a). *Anuario Estadístico de Cuba 2017*. Centro de Gestión de la Información Económica, Medioambiental y Social.
- ONEI. (2018b). *Panorama ambiental. CUBA 2017*. Centro de Gestión de la Información Económica, Medioambiental y Social.
- Osorio, E. (2016). *Valorización costo-beneficio del manejo integral de los residuos sólidos, aplicable a conjuntos residenciales en la Ciudad de Cali*. (Tesis). Universidad del Valle. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/9262>
- Pérez, V., Lorenzo, L., & Sarduy, A. (2015). *Gestión ambiental de los residuos sólidos urbanos en Sancti Spíritus: identificación de debilidades y perspectivas*. (Tesis). Universidad de Sancti Espíritus.
- Rodríguez, S. (2019). *Integración de las potencialidades energéticas al desarrollo local del municipio de Cienfuegos*. (Tesis). Universidad de Cienfuegos.
- Taha, H A. (2012). *Investigación de Operaciones*. Pearson Education.
- Vecchi, T. P. B., Surco, D. F., Constantino, A. A., Steiner, M. T. A., Jorge, L. M. M., Ravagnani, M. A. S. S., & Paraíso, P. R. (2016). A sequential approach for the optimization of truck routes for solid waste collection. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 238–250. <http://doi.org/10.1016/j.psep.2016.03.014>
- Yordá, J. (2018). El problema del cartero chino. (Tesis de Maestría). Universidad de Vigo.
- Zeng, H., Wu, Y., Zhang, D., & Li, J. (2007). *A hybrid algorithm for large-scale vehicle routing problem in real traffic condition*. Paper presented at the Automation and Logistics, IEEE International Conference.