

Algoritmo genético aplicado al recojo de residuos sólidos en el contexto de una smart city

Genetic algorithm applied to the solid waste collection in the context of a smart city

Jorge Luis Gutiérrez Gutiérrez^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-4989-1196>

¹ Universidad Nacional de Trujillo, Jr. Diego de Almagro 344, Trujillo, Perú.

jgutierrez@unitru.edu.pe

* Autor para la correspondencia. (jgutierrez@unitru.edu.pe)

RESUMEN

La presente investigación se desarrolla en el contexto de una *smart city*, recoge data de la ciudad de Trujillo respecto del problema de recolección de residuos sólidos; se presenta un algoritmo inteligente de ruteo basado en algoritmos genéticos, solución de inteligencia artificial; usa datos que suministra los colectores de residuo, ejecuta operadores genéticos de selección, cruce y mutación, evoluciona las soluciones en progreso y obtiene una solución aceptable al problema. Implica diversas tecnologías del internet de las cosas como sensores en los colectores de residuos, un algoritmo inteligente de ruteo y un sistema de comunicaciones capaz de comunicar las salidas del algoritmo a los diversos vehículos, proyecta el ahorro de recursos como tiempo, personal, combustible y otros en beneficio de la comuna trujillana en este caso.

Palabras Clave: algoritmo; genético; residuos; smart city.

ABSTRACT

This research is developed in the context of a smart city collecting data from the city of Trujillo regarding the problem of solid waste collection. This paper introduces an intelligent routing algorithm based on genetic algorithms, artificial intelligence solution; takes as input the data that supplies the waste collectors, execute the selection, crossing and mutation operators, evolve the solutions obtained and finds an acceptable solution to the problem. It involves various technologies of the internet of things such as sensors in waste collectors, an intelligent routing algorithm and a communications system capable of to communicate the outputs of the algorithm to the various vehicles, projects the saving of resources such as time, personnel, fuel and others for the benefit of the trujillians in this case.

Keyword: algorithm; genetics; waste; smart city.

Recibido: 06/07/2021
Aceptado: 16/08/2021

INTRODUCCIÓN

La Secretaría de Gobierno Digital de la Presidencia del Consejo de Ministros del Perú es el órgano de línea con autoridad técnico-normativa a nivel nacional; proyecta el concepto Smart City, desarrolla los servicios públicos digitales; una Smart City o ciudad inteligente es aquella que emplea los recursos tecnológicos en ámbitos empresariales y en políticas públicas con el fin de conseguir un desarrollo urbano basado en la sostenibilidad y que sea capaz de responder adecuadamente a las necesidades básicas de sus instituciones, empresas y en sus habitantes. Los desechos son desperdicios que los vecinos, las empresas o las industrias botan como basura; pueden ser gases, líquidos o sólidos. Pueden ser orgánicos, inorgánicos; clasificados como papeles, vidrio, electrónicos, entre otros.

La Municipalidad Provincial de Trujillo cuenta con el Servicio de Gestión Ambiental de Trujillo – SEGAT; planifica rutas de recojo de basura de manera estática es decir ha establecido rutas fijas y tres horarios de recojo de basura.

Se justifica esta investigación porque propone el diseño de un algoritmo genético ad hoc al problema del recojo de residuos sólidos generados en el distrito de Trujillo en el contexto de una *Smart City*, lo que permitirá aplicar la Inteligencia Artificial a un problema real; es importante porque se evalúa la función de calidad luego de plantear sensores en los recolectores de basura. Este trabajo muestra toda la funcionalidad del algoritmo genético y su parametrización permitirá realizar un análisis de sensibilidad para determinar la mejor ruta de recolección de residuos para cubrir un área geográfica delimitada; pertenece actualmente al área de conocimiento Sistemas Inteligentes subárea Búsqueda Avanzada de la currícula en Ciencia de la Computación del ACM; se alinea al Objetivo específico 02 del Eje Estratégico 1: Fortalecimiento de capacidades del Plan Nacional de gestión integral de los residuos sólidos 2016-2024, propuesto por el Ministerio del Ambiente, MINAM.

Los problemas de planificación son problemas NP, la Inteligencia Artificial aborda estos problemas con métodos de búsqueda heurísticos o metaheurísticos; estos problemas se encuentran en la categoría de aproximados porque no encuentran una solución óptima al problema sino una aproximada (Idwan y otros, 2020). Este problema es NP-completo, existen métodos exactos y aproximados que tratan de resolverlo. Entre los métodos exactos tenemos el método de fuerza bruta que enumera todos los posibles caminos; es impráctico por tener alta complejidad computacional $O(n!)$. Una buena solución se presenta en la optimización dinámica de rutas generadas para el problema de ruteo de vehículos (VRP) que usa 52 puntos de recojo y depósito (Alwabri y Kostanic, 2020). Importante es también la solución al problema de ruteo de vehículos con restricciones de distancia asimétrica (Ban y Nguyen, 2021). Prometedores resultados se encuentran en la aproximación metaheurística al problema de ruteo de vehículos multicompartimento (MCVRP) que usa algoritmo voraz y genético (Yahyaoui y otros, 2020) como en el de optimización de rutas de vehículos capacitados (Guloyan y Aydin, 2020). Existen también métodos basados en la programación lineal con buenos resultados. Para la recolección de los residuos se asume que los nodos cuentan con sensores que reportarán datos sobre el nivel de los

colectores lo que permitirá reducir los nodos visitados en la ruta establecida; se ahorra tiempo de recojo y costos de combustible de los camiones recolectores.

El proyecto Horizonte 2020 proporciona financiamiento a todas las etapas del proceso de innovación dirigido a proporcionar un beneficio directo a los ciudadanos como protección contra el ciberdelito, economía eficiente y baja del carbono. (Horizonte, 2018).

Yu y otros proponen una solución mejorada al problema de recolección de residuos basado en un algoritmo genético. (Yu y otros, 2020). Liu y Liao desarrollan también una solución al problema e incluyen clasterización por k-means y una heurística de búsqueda basada en el algoritmo Clarke & Wright (Liu y Liao, 2021). El Internet de las cosas (IoT) ayuda a eliminar muchos problemas de gestión ambiental y socioeconómicos especialmente en smart cities (Aktemur y otros, 2020). Un algoritmo genético para la gestión de residuos fue probado en un área simplificada (Ozmen y otros, 2020). Existe una propuesta de 3 pasos para recolectar los desperdicios, captura la información desde los colectores y los remite al sitio web CollectMyWaste para luego planificar el recojo (Kalyuzhnyy y otros, 2020). Hay soluciones para regular el tránsito vehicular basado en Open Hardware y semáforos inteligentes. (Peralta y Mendieta, 2017).

Se ha enunciado el problema de investigación como sigue, ¿Cómo planificar rutas de recojo de residuos automáticamente en la ciudad de Trujillo en el contexto de ser una smart city? Se ha formulado el objetivo general, Implementar un algoritmo genético para determinar una ruta aceptable de recojo de residuos sólidos en Trujillo.

Este artículo presenta en su estructura una sección Métodos donde se presenta la metodología de la investigación aplicada para responder a la pregunta de investigación; la sección Resultados y discusión presenta un análisis del problema, así como el diseño del algoritmo y la contrastación con algunos antecedentes de las referencias revisadas.

MÉTODOS

Diseño de investigación

El diseño es no experimental (Ñaupas y otros, 2018) del tipo descriptivo simple con un enfoque cuantitativo. Esta investigación por su naturaleza es de tipo aplicada; y por su alcance, descriptiva.

La población está conformada por los diversos métodos que tratan al problema de la planificación de rutas revisados en el estado de arte de esta investigación como son métodos exactos y aproximados. Se ha tomado como muestra un algoritmo genético aplicado al problema de recojo de residuos sólidos, el cual es un método aproximado, específicamente una metaheurística.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La principal técnica utilizada es la observación del funcionamiento del algoritmo genético diseñado para esta investigación. El instrumento está constituido por un programa de aplicación escrito en lenguaje java que implementa el algoritmo genético. Este programa recoge las coordenadas de longitud y latitud de la ciudad de Trujillo, con especial interés en la ruta 7 de recojo de residuos sólidos propuesto por el SEGAT.

Procesamiento y análisis de la información

Se recoge información de la ruta 7 de recojo de residuos sólidos; luego se identifican los nodos de un multigrafo dirigido ponderado correspondientes en un mapa de *Google Maps*, se obtiene la latitud y la longitud de cada nodo; con esta información se diseña el cromosoma que representa una posible solución al problema. Luego de evolucionar las 1 000 generaciones del algoritmo se obtiene el cromosoma con mayor valor de aptitud; se proyectan las distancias recorridas por un camión recolector de residuos sólidos. Finalmente, se comparan estas distancias proyectadas con las distancias recorridas en la actualidad para establecer un diferencial, lo que constituye un factor importante en la evaluación del algoritmo como parte de una solución integral al problema de investigación. Se utiliza estadística descriptiva para presentar los resultados obtenidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con la ruta 07 de recojo de basura de Trujillo turno mañana, se ha identificado los nodos posibles por donde pasa un camión recolector de residuos sólidos. Son 119 nodos de color rojo los que conforman un grafo complejo para de determinar una ruta óptima. Estos 119 nodos en el contexto de *smart city* pueden tener sensores IoT a efectos de comunicar el estado de depósitos recolectores de basura.

Para comprender mejor el funcionamiento del algoritmo genético se ha abstraído de la realidad algunos nodos para ilustrar el multigrafo dirigido ponderado; es dirigido puesto que los nodos siguen el sentido de las calles, pueden ser de un solo sentido o de ida y vuelta; es ponderado porque las aristas del multigrafo tiene asociadas un valor necesario en este caso al tratarse de un algoritmo genético que busca optimizar la ruta. Este valor es la distancia en metros que se ha calculado a partir de la data que ofrece *Google Maps*.

No se ha reportado calles de un solo sentido al parecer porque esta ruta 7 cubre urbanizaciones delimitadas por grandes avenidas. Para una mejor visualización del multidigrafo se ha tratado de separar las puntas de las flechas.

Nótese, que existen aristas que por la geografía de la zona tienen formas curvas o son eles; la mayoría son líneas casi rectas. Se observa que el grafo es conexo puesto que existe un camino entre cualquier par de nodos; también se afirma que el grafo es incompleto porque no existe una arista que una a cualquier par de vértices; tampoco es regular porque no tiene el mismo número de aristas entrantes o salientes de cada vértice. Es importante resaltar que el multidigrafo no es hamiltoniano, es decir no hay una trayectoria que recorre todos los vértices exactamente una sola vez, se inicia en un nodo y termina en el mismo.

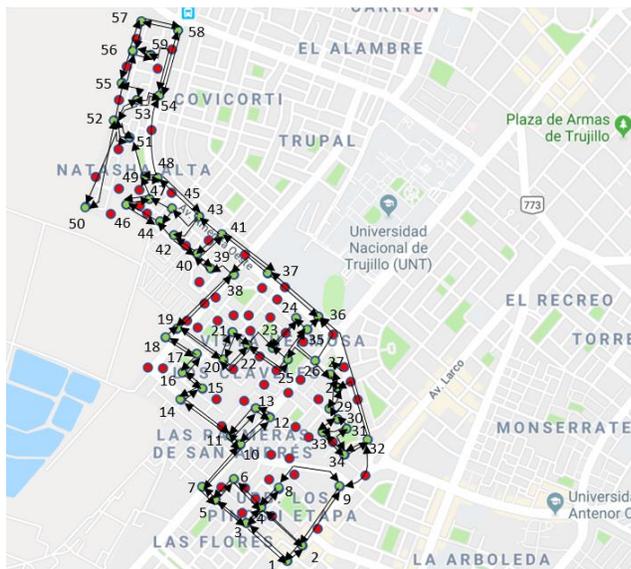


Fig. 1 - Multigrafo dirigido ponderado de la ruta 07.

A continuación, se convierte el multidigrafo en una matriz de adyacencia en la que se visualiza las conexiones entre los diversos nodos y las ponderaciones obtenidas como distancias. Esta información se obtiene de la matriz de adyacencia, se parte desde el nodo 1 y se elige sus adyacentes al azar hasta alcanzar el nodo 1 de regreso. Como el grafo no es regular entonces el número de genes del cromosoma no será el número de nodos disponibles del multidigrafo; es decir será un valor mayor que 59 porque recorrerá más de una vez algún nodo. Los genes del cromosoma es un registro de longitud variable; debe contener a todos los nodos de la ruta 07. Así los cromosomas serían una secuencia aleatoria y adyacente de nodos para cubrir cada multidigrafo de la Figura 1 anterior. Figura 2

2	4	3	5	9	2	1
---	---	---	---	------	---	---	---

Fig. 2 - Cromosoma aleatorio para el multidigrafo de la ruta 07.

El cromosoma inicia con el siguiente nodo desde el nodo n1, por lo que se justifica en la Figura 3 iniciar con el nodo 2. Una función de reparación evita ciclos y recompone el cromosoma para que represente un camino factible. También se restringe la longitud a un máximo del doble de los nodos

del multidigrafo, es decir máximo 118. En la Figura 3 siguiente se muestra cómo lo que pretende la función de reparación:

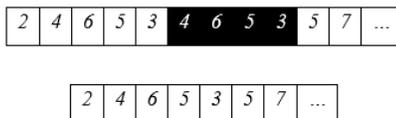


Fig. 3 - Cromosoma aleatorio reparado para el multidigrafo de la ruta 07.

Se desea minimizar la distancia total recorrida para cubrir la ruta 07, por lo que la función de aptitud (*fitness*) o de calidad está dada por:

$$\text{Mín } f_{ind} = \sum_{i=1}^L d_i$$

L representa la longitud del cromosoma, i es el índice del gen, f es la función de aptitud de un individuo, d es la distancia entre el nodo actual y el nodo guardado en el índice del gen del cromosoma. Para ejemplificar la función de aptitud, se presenta el siguiente ejemplo ilustrativo, donde se tiene un cromosoma que parte del nodo 1 y retorna a sí mismo: Figura 4

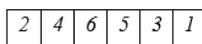


Fig. 4 - Cromosoma aleatorio que parte del nodo 1 y finaliza en sí mismo.

Se calcula la sumatoria al sumar la distancia en metros desde el nodo 1 al 2, del 2 al 4, del 4 al 6, del 6 al 5, del 5 al 3 y del 3 al 1. Una variable acumula la suma de estas distancias.

$$\sum_{i=1}^L = 80 + 50 + 60 + 50 + 70 + 40 = 350$$

La función de calidad para el individuo representado por el cromosoma de la Figura 5, es 350.

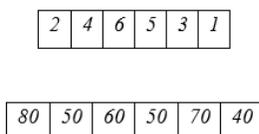


Fig. 5 - Cromosoma aleatorio que parte del nodo 1 y finaliza en sí mismo y sus distancias respectivas de los nodos presentes en su trayectoria.

Se inicia la población al azar; por lo que de acuerdo al tamaño establecido se obtendrán 200 individuos al azar de longitud variable que completen el recorrido de los 59 nodos del multidigrafo de la ruta 07. Debe asegurar que cada individuo contenga en su cromosoma el recorrido de los 59 nodos y que cada individuo sea factible; es decir, cada individuo debe completar el recorrido o visita de todos los nodos y volver al inicio, nodo 1.

Se aplicó la estrategia elitista para seleccionar 4 individuos; los dos primeros para que subsistan en la siguiente generación, se mantiene 1 o 2% de la población de individuos; luego los otros dos servirán para cruzarlos con los demás individuos no elitistas.

La estrategia que se adopta de cruce combina el tercer individuo elitista con los primeros 48 individuos no elitistas, y el cuarto individuo elitista con los segundos 48 individuos no elitistas. El cruce procede si entre ambas cromosomas padres existe dos nodos en común en el mismo sentido, es decir como los nodos siguen una trayectoria de inicio a fin, se requiere que existan dos nodos n_i y luego n_j en cada cromosoma; esto para no perjudicar un probable individuo reportado como fáctico.

Se aplica la función de reparación para hacer fáctico el cromosoma de los individuos hijos resultantes; pueden quedar trancos si se llega a ocupar los 200 genes que es el límite que se puso al cromosoma de cada individuo.

Se mutan 8% de los individuos; para lo cual se sacarán 8 números al azar para determinar qué individuo mutará. Luego, se configura una probabilidad de mutación de gen con un valor de 0.08; significa que si sacamos un valor al azar menor que 0.08 el individuo mutará, caso contrario no. En caso deba mutar, sacamos un número al azar entre 1 y la longitud L del cromosoma; este será el gen a mutar. A partir de este gen, se generará de nuevo al azar los demás nodos de la trayectoria hasta alcanzar al destino final que es el nodo 1.

A partir de este gen se obtendrá nuevamente toda la trayectoria faltante; así de paso se asegura de tener un cromosoma fáctico. El resultado se muestra a continuación: Figura 6

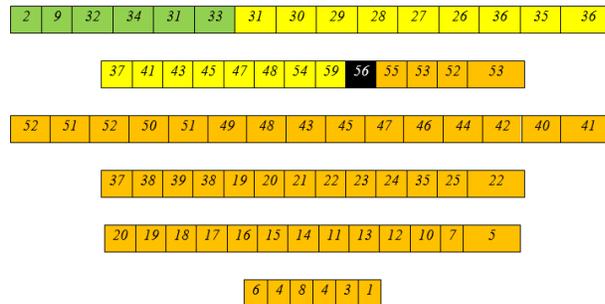


Fig. 6 - Individuo cuyo cromosoma mutó a partir del gen 24.

Cuando haya finalizado se obtiene la primera generación. Se deja evolucionar 1 000 generaciones y obteniéndose finalmente los individuos con mejor función de aptitud los que serán reportados como solución al problema.

Este individuo presenta una función de aptitud igual a 10 410, lo que significa que un camión recolector de residuos sólidos recorrerá 10 410 metros lineales. Este valor presenta un error máximo de 5% puesto que las distancias fueron tomadas de *Google Maps* y redondeadas a valores enteros para facilitar la presentación de los datos y la programación de la aplicación.

El mejor individuo corresponde a una ruta a seguir presentada en la figura 8; se identifica además los puntos rojos que no están en la trayectoria y que aproximadamente miden 2 000 metros lineales; esto significa que si un camión recolector tuviera que recoger los residuos de los 119 nodos originales de la situación problemática y al tomar como referencia la trayectoria proyectada por el mejor individuo encontrado el camión tendría que recorrer 12 410 metros lineales, siempre con un error máximo de 5% en la medición de este valor. Figura 7, Figura 8

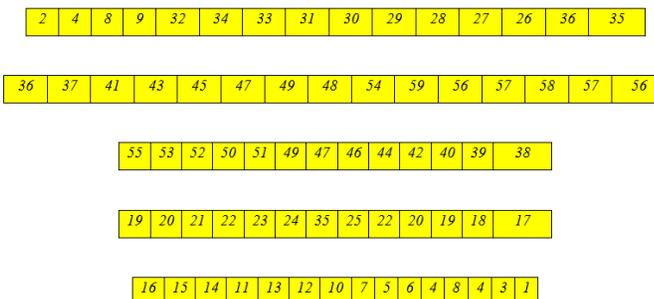


Fig. 7 - Mejor individuo reportado luego de ejecutar el algoritmo genético.

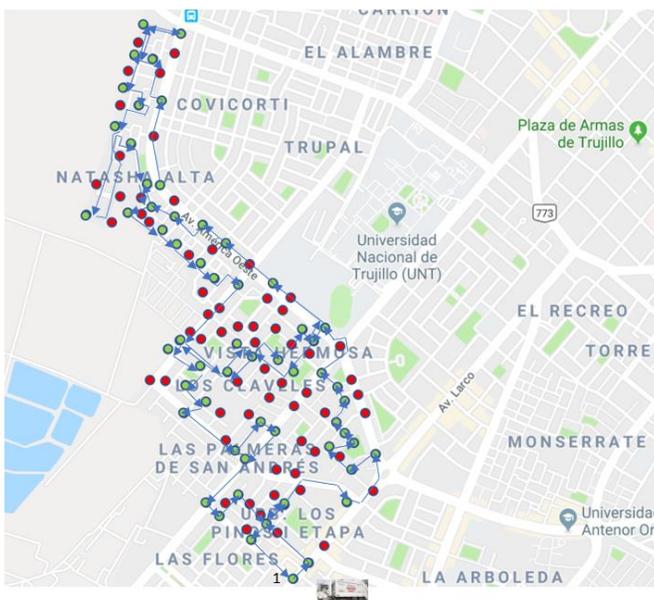


Fig. 8 - Trayectoria de recojo de residuos sólidos proyectada por el mejor individuo.

La solución presentada permite ahorrar 16.11% del recorrido, casi 2 Km; traducido a galones y con un rendimiento de 20 Km/gal de petróleo, permite ahorrar 0.10 de galón. Esto multiplicado por 3 turnos diarios por 30 días por 12 meses por 10 rutas por 11 soles el galón de petróleo, da como resultado 11 880 soles por año. No se ha considerado el costo de mantenimiento, satisfacción de los vecinos, recursos humanos, entre otros. Este valor puede variar en función del área geográfica.

Los resultados obtenidos son alternativos a los antecedentes revisados del tema donde otras tecnologías y/o procedimientos son mayormente utilizados en aplicaciones logísticas, de turismo,

de recojo de escolares, de visitas domiciliarias, reparto de correo; también en el campo de la industria como para la fabricación de circuitos electrónicos; y concuerdan con los presentados en la gestión óptima de residuos sólidos mediante Internet of things. (Idwan y otros, 2019).

En los antecedentes presentados, la solución de Aktemur pasa por un modelamiento TSP gráfico en el cual se debe visitar todos los nodos al menos una vez. Esto ocurre en la solución presentada por la geografía de la ciudad de Trujillo y en particular de la zona comprendida en la ruta 07; TSP es la base para inspiración de muchas heurísticas diseñadas para la optimización combinatoria como son los algoritmos genéticos, motivo de esta investigación, la búsqueda tabú, colonia de hormigas, enjambre de partículas, entre otras.

Al igual que la característica del ruteo selectivo de vehículos SVRP (Posada y otros, 2020) los resultados obtenidos en este trabajo seleccionaron solo los puntos de colectores que activaron una señal que indicaba su recojo.

Puede ampliarse esta investigación a un sistema inteligente de riego de parques y jardines para la ciudad de Trujillo; se puede tener un sensor por parque que determine el nivel de humedad del parque y la temperatura del ambiente y luego un camión precisará la cantidad de agua y el tiempo de riego.

La monitorización de indicadores ambientales es clave para mejorar la calidad de vida (Maciá y otros, 2017), por lo que la investigación puede aplicarse a *smart universities*.

CONCLUSIONES

Se implementó un algoritmo genético que determina una ruta aceptable de recojo de residuos sólidos en Trujillo por inducción aplicable a otras ciudades de similares características. Se determinó 119 puntos de recojo de residuos en la ruta 7 en función a la geografía de dicha ruta.

Se diseñó el cromosoma para el problema estudiado, el cual es de longitud variable, se deriva al azar desde la matriz de adyacencia del multidigrafo que abstrae los puntos (nodos) activos de la ruta 7. La función de calidad está en función de la distancia en metros entre los nodos de la ruta 7. Se implementó la estrategia elitista para asegurar la supervivencia de los mejores individuos encontrados en cada generación. Se elaboró una heurística para el cruce, la cual tiene dos puntos de corte. La mutación fue implementada mediante un número al azar que coincide con el índice del gen. Se determinó el ahorro de 16.11% de la distancia recorrida proyectada con la distancia recorrida en la situación actual.

REFERENCIAS

- Aktemur I. Erensoy K. Kocyigit E. *Optimization of Waste Collection in Smart Cities with the use of Evolutionary Algorithms*. 2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA), Ankara, Turkey, 2020, pp. 1-8. Disponible en: 10.1109/HORA49412.2020.9152865
- Alwabli A. Kostanic I. *Dynamic Route Optimization for Waste Collection Using Genetic Algorithm*. 2020 International Conference on Computer Science and Its Application in Agriculture (ICOSICA). Bogor, Indonesia, 2020, pp. 1-7. Disponible en: 10.1109/ICOSICA49951.2020.9243256
- Ban HB. Nguyen P.K. *A hybrid metaheuristic for solving asymmetric distance-constrained vehicle routing problem*. Comput Soc Netw 8, 3, 2021 Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s40649-020-00084-7>
- Guloyan G. Aydin R. *Optimization of Capacitated Vehicle Routing Problem for Recyclable Solid Waste Collection Using Genetic and Seed Genetic Algorithms Hybridized With Greedy Algorithm*. 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Singapore, Singapore, 2020, pp. 595-599. Disponible en: 10.1109/IEEM45057.2020.9309901
- Ñaupás Paitán Humberto. Valdivia Dueñas Marcelino. Palacios Vilela Jesús. Romero Delgado Hugo. *Metodología de la investigación*. Colombia: Ediciones de la U, 2018, 5ta ed.

Horizonte 2020. *Portal español del Programa Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea*, 2018. Disponible en: <https://eshorizonte2020.es/>

Idwan, S., Mahmood, I., Zubairi, J.A. et al. *Optimal Management of Solid Waste in Smart Cities using Internet of Things*. *Wireless Pers Commun* 110, 485–501, 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06738-8>

Kalyuzhnyy V. Costa M. Silva P. Santos J. *Smart City IoT System – CollectMyWaste*. 2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), Istanbul, Turkey, 2020, pp. 1-5. Disponible en: 10.1109/ISMSIT50672.2020.9255271

Liu L. Liao W. *Optimization and profit distribution in a two-echelon collaborative waste collection routing problem from economic and environmental perspective*. *Waste Management*, Volume 120, 2021, Pages 400-414, ISSN 0956-053X, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.045>

Maciá Pérez Francisco. Berná José. Sanchez José. Lozano Iren. Fuster Andrés. *Smart University. Hacia una Universidad más abierta*. Barcelona: Editorial Marcombo, 2017.

Peralta Fuentes José. Mendieta Zavala Julio. *Semáforo inteligente para regular el tránsito vehicular basado en Open Hardware*. Arequipa: Universidad Católica Santa María, 2017.

Ozmen M. Sahin H. Koray O. *Genetic Algorithm Based Optimized Waste Coleection in Smart Cities*. 2020 International Conference on Electrical Engineering (ICEE). Istambul, Turkey, 2020, pp. 1-6. Disponible en 10.1109/ICEE496991.2020.9249837

Posada A. Rivera J.C. Palacio J.D. *Selective Vehicle Routing Problem: A Hybrid Genetic Algorithm Approach*. *Lecture Notes in Computer Science*, vol 12052. Springer, Cham. 2020. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-030-45715-0_12

Yahyaoui H. Kaabachi I. Krichen S. y otros. *Two metaheuristic approaches for solving the multi-compartment vehicle routing problem*. *Oper Res Int J* 20, 2085–2108, 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12351-018-0403-4>

Yu X. Zhou Y. Liu X. *The two-echelon multi-objective location routing problem inspired by realistic waste collection applications: The composable model and a metaheuristic algorithm*. *Applied Soft Computing*, Volume 94, 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106477>

Conflicto de interés

El autor autoriza la distribución y uso de su artículo.