

# Design of transportation routes to improve operational efficiency in a medium-sized company in the electrical sector.

Alexis Fabián Fernández Hernández<sup>1</sup>; Absalón Rivasplata Sanchez<sup>2</sup>; Marcos Gregorio Baca Lopez<sup>3</sup>  
<sup>1, 2, 3</sup> Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Perú.  
Emails: <sup>1</sup> 71820807@usat.pe; <sup>2</sup> arivasplata@usat.edu.pe; <sup>3</sup> mbaca@usat.edu.pe

*Abstract – In the electricity sector, efficiency in the management of transportation routes is essential to reduce costs and improve productivity. A medium-sized company in the electricity sector in Peru faces inefficiencies in route planning, which generates high operating costs and long travel times. This study proposes to optimize the design of transportation routes by implementing several heuristic algorithms programmed in Python, with a focus on minimizing operating times. For this purpose, four optimization approaches were developed and compared: sweep heuristics, sparing heuristics, clustering and a genetic algorithm. The evaluation was performed based on key indicators such as fuel costs, travel times, distance traveled and operating efficiency. The results show that the savings heuristic is the most efficient method, achieving a 27,1% reduction in fuel costs, a 33% reduction in travel time and an 18,52% increase in operating efficiency. The relevance of training personnel and using Geographic Information Systems to sustain continuous improvements was also identified. It is concluded that the practical implementation of these heuristics in Python, supported by a multi-criteria analysis, significantly optimizes the company's logistics operations.*

*Key words: Route optimization, heuristic algorithms, operational efficiency, geographic information systems.*

# Diseño de rutas de transporte para mejorar la eficiencia operativa en una empresa mediana del rubro eléctrico

Alexis Fabián Fernández Hernández<sup>1</sup>; Absalón Rivasplata Sanchez<sup>2</sup>; Marcos Gregorio Baca Lopez<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Perú.

Emails: <sup>1</sup> 71820807@usat.pe; <sup>2</sup> arivasplata@usat.edu.pe; <sup>3</sup> mbaca@usat.edu.pe

**Resumen-** *En el sector eléctrico, la eficiencia en la gestión de rutas de transporte es fundamental para reducir costos y mejorar la productividad. Una mediana empresa del sector eléctrico en el Perú enfrenta ineficiencias en la planificación de rutas, lo que genera altos costos operativos y tiempos de traslado prolongados. Este estudio propone optimizar el diseño de rutas de transporte mediante la implementación de varios algoritmos heurísticos programados en Python, con un enfoque en la minimización de los tiempos de operación. Para ello, se desarrollaron y compararon cuatro enfoques de optimización: heurística de barrido, heurística de ahorro, clusterización y un algoritmo genético. La evaluación se realizó con base en indicadores clave como costos de combustible, tiempos de traslado, distancia recorrida y eficiencia operativa. Los resultados muestran que la heurística de ahorro es el método más eficiente, logrando una reducción del 27,1% en costos de combustible, una disminución del 33% en tiempos de traslado y un incremento del 18,52% en la eficiencia operativa. Asimismo, se identificó la relevancia de entrenar al personal y utilizar Sistemas de Información Geográfica para sostener mejoras continuas. Se concluye que la implementación práctica de estas heurísticas en Python, apoyada en un análisis multicriterio, optimiza significativamente las operaciones logísticas de la empresa.*

**Palabras clave:** *Optimización de rutas, algoritmos heurísticos, eficiencia operativa, sistemas de información geográfica.*

## I. INTRODUCCIÓN

En el entorno empresarial global cada vez más competitivo, la eficiencia operativa es crucial para el éxito sostenible. Según McKinsey & Company, la optimización de rutas de transporte emerge como un componente crítico, con organizaciones líderes como DHL, Walmart y Amazon que han logrado reducciones significativas en costos y mejoras en la productividad mediante estrategias avanzadas de optimización de rutas. Estos ejemplos subrayan la importancia de adoptar estas prácticas para mejorar la eficiencia operativa [1].

En el contexto peruano, las empresas de logística y servicios destinan entre el 20% y el 40% de sus ingresos al combustible [2]. Estudios muestran que las empresas que optimizan sus rutas presentan una rentabilidad económica superior en promedio de 2.5% y una productividad laboral de 6% más alta [3]. A pesar de ello, en la región de Lambayeque,

Perú, es notable la falta de adopción de metodologías avanzadas de optimización de rutas, lo que resulta en altos costos operativos y baja eficiencia en la mayoría de las empresas de logística y transporte [4].

La empresa en estudio, se encuentra afiliada a un consorcio y destaca en la prestación de servicios eléctricos en la región Lambayeque, Perú. Sin embargo, enfrenta un desafío significativo en sus operaciones: la falta de optimización en las rutas de transporte hacia sus sucursales. Esta deficiencia se debe a falta de capacitación del personal, ausencia de seguimiento de datos históricos, carencia de vehículos con GPS y falta de acceso a sistemas de información geográfica, resultando en distancias y tiempos no óptimos que perjudican directamente a las operaciones de la empresa, provocando ineficiencias en la gestión de recursos durante la ejecución de contratos.

La inadecuada planificación de rutas ha generado impactos significativos en los indicadores operativos de la empresa: la eficiencia operativa alcanza un 123,33% mensual en promedio, con solo un 57% de tiempo productivo efectivo, esto en base al tiempo específico empleado para realizar el servicio. Los costos de combustible ascienden en dólares a \$ 411 063,07, lo que representa el 39,62% de los ingresos totales. Hasta diciembre de 2023, la empresa solo ha logrado ejecutar el 43,91% del monto proyectado en el contrato trianual, alcanzando \$ 1 037 393,20 de los \$ 2 310 135,21 previstos. Asimismo, registra un promedio mensual de 32 órdenes de servicio sin atender y un sobre costo por mano de obra de 14,28%.

Ante esta problemática, el presente trabajo propone el diseño de rutas optimizadas para incrementar la eficiencia operativa de la empresa. El aporte radica en la implementación de un conjunto de heurísticas de ruteo (barrido, ahorro, clusterización y genético) programadas en Python empleando datos reales de la empresa; y en la validación de los resultados mediante indicadores de eficiencia operativa propios del sector. De este modo, el estudio no solo identifica la heurística más eficiente en el contexto analizado, sino que también ofrece una solución práctica replicable en entornos similares. Académicamente, contribuye con evidencia comparativa sobre la efectividad relativa de diferentes enfoques de optimización

de rutas. Desde la perspectiva empresarial, propone acciones concretas (capacitación del personal y uso de SIG) para garantizar la sostenibilidad de los resultados.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

El tipo de investigación realizada es aplicada, enfocada en resolver problemas prácticos con el fin de adquirir conocimientos directamente aplicables para solucionarlos [5]. Esta investigación fue descriptiva correlacional causal, ya que correlacionó variables que reflejan una situación específica durante un período determinado y analizó meticulosamente las relaciones de causa y efecto [5]. El diseño de la investigación fue no experimental, lo que implicó que no se manipuló la variable independiente de manera intencional ni se estableció un control directo sobre las condiciones del estudio; en cambio, se observó el impacto de la variable independiente, que en este caso es la optimización de rutas de transporte [6].

En la Fig. 1, se muestra el esquema del diseño de investigación:

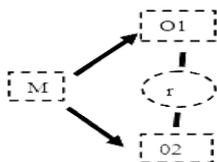


Fig. 1 Esquema del diseño de investigación

Donde:

M: Data histórica de recorridos, incluyendo tiempos y distancias.

O1: Variable 1: Eficiencia operativa en la prestación de servicios eléctricos.

O2: Variable 2: Optimización de rutas de transporte.

r: Relación entre las dos variables: Optimización de rutas de transporte y su impacto en la eficiencia operativa de la empresa.

El objeto de estudio es el sistema de rutas de transporte de la empresa en estudio, dedicada a la prestación de servicios eléctricos. La población incluye todas sus sucursales y los servicios eléctricos realizados en el año 2023; la muestra se obtuvo por conveniencia, seleccionando los 29 servicios más representativos y la ruta principal que conecta todas las sucursales.

Previo al trabajo en campo, se realizó una revisión exhaustiva de la literatura especializada y bases de datos relevantes como Scopus, Web of Science y Dialnet, tomando en cuenta lo referente a los estudios de Paz *et al* [7], Frómeta y Pérez [8], López *et al* [9], Mora *et al* [10], Haro *et al* [11], Zapata *et al* [12], Rodríguez *et al* [13], Ruiz [14], Sánchez y Gutiérrez [15], Urango *et al* [16], Cuadra y Torres [17], Chilón [18], Damayanti *et al* [19], Sulemana *et al* [20] y Apaydin [21] obteniendo información actualizada sobre la optimización de rutas de transporte y su relación con la eficiencia operativa.

Para la recolección de datos se llevaron a cabo visitas a las instalaciones de la empresa en estudio y se realizaron

entrevistas a empleados y técnicos electricistas para recopilar datos cualitativos sobre las prácticas existentes y posibles áreas de mejora. Además, se recopiló y analizó data histórica de la empresa, examinando registros de servicios anteriores, órdenes de trabajo y datos específicos de un escenario donde se realizaron 29 servicios en las sucursales, proporcionando así una medida cuantitativa precisa del rendimiento operativo.

Los datos recopilados se importaron y analizaron en Python 3.11 (Visual Studio Code), empleando las librerías Pandas [22], NumPy [23], Scikit-learn y Matplotlib [24], así como los módulos nativos time y random para gestionar la temporización y aportar aleatoriedad al algoritmo genético. Para el análisis geoespacial y la visualización de rutas se utilizó Google Maps [16], permitiendo ajustar dinámicamente los itinerarios de acuerdo con el tráfico y el estado vial. A partir de esta base de datos, se implementaron modelos matemáticos de ruteo como la heurística de barrido, heurística de ahorro en su versión secuencial, heurística de clusterización y algoritmos genéticos, procesando la información histórica para generar modelos predictivos y optimizar las rutas de desplazamiento de las cuadrillas, resultando una mejora significativa de la eficiencia operativa. Finalmente, para abordar las causas subyacentes identificadas, se propuso un plan de capacitación y la adquisición de un software especializado en SIG con el fin de fortalecer la gestión de la información geográfica.

## III. RESULTADOS

### A. Situación actual

El análisis realizado en la empresa abarcó 29 servicios eléctricos en las sucursales distribuidos en la región Lambayeque, como se muestra en la Fig. 2. Las órdenes de trabajo se ejecutan mediante las únicas siete cuadrillas encargadas de las sucursales designadas por la empresa, cada una compuesta por un técnico electricista y un técnico conductor, quienes se desplazan en camionetas 4x4 durante jornadas laborales de 8 horas diarias (restricción para el modelamiento). Es importante destacar que la empresa principal asigna las órdenes de trabajo a la empresa en estudio con anticipación para la adecuada planificación y ejecución de los servicios que serán realizadas por las cuadrillas. En la Fig. 2 se muestran las sucursales donde opera la empresa en estudio.



Fig. 2 Distribución de las sucursales.

Los servicios son clasificados por parte de la empresa en cinco categorías, con tiempos promedio de ejecución: nuevo servicio (45 minutos), reapertura (35 minutos), corte (30 minutos), inspección (30 minutos) y mantenimiento (40 minutos). De los servicios programados, se completaron exitosamente 27, alcanzando una tasa de cumplimiento del 93,10%. La distribución de las tareas entre las cuadrillas se realizó considerando criterios de ubicación geográfica y disponibilidad operativa.

Para el desempeño operativo incluyó el análisis de los siguientes indicadores clave en el escenario estudiado: distancias recorridas, tiempos de desplazamiento, consumo de combustible, costos laborales e ingresos generados por cada cuadrilla, como se detalla en la Tabla 1.

TABLA I  
RESUMEN DEL ESCENARIO (REAL)

| Cuadrilla | Distancia (km) | Tiempo (min) | Costo combustible (\$) | Costo mano de obra (\$) | Ingresos (\$) |
|-----------|----------------|--------------|------------------------|-------------------------|---------------|
| 1         | 232,28         | 361,8        | 80,16                  | 52,13                   | 203,59        |
| 2         | 80,43          | 184,95       | 27,28                  | 33,23                   | 205,88        |
| 3         | 274,32         | 429,3        | 88,66                  | 38,42                   | 163,98        |
| 4         | 183,74         | 267,3        | 62,93                  | 33,23                   | 159,68        |
| 5         | 155,16         | 255,15       | 50,93                  | 41,33                   | 133,16        |
| 6         | 122,8          | 202,50       | 21,65                  | 33,23                   | 163,92        |
| 7         | 421,61         | 541,4        | 133,46                 | 68,54                   | 178,42        |
| TOTAL     | 1 470,34       | 2 242,4      | 465,33                 | 300,12                  | 1 168,18      |

Nota: Estos resultados fueron obtenidos en base a la recopilación de la data perteneciente al escenario que se describe.

La Tabla II, muestra los indicadores de desempeño operativo para los 29 servicios eléctricos analizados en la situación actual de la empresa.

TABLA II  
INDICADORES CORRESPONDIENTES AL ESCENARIO

| Indicador              | Valor | %      |
|------------------------|-------|--------|
| Eficiencia operativa   | -     | 123,33 |
| N° de servicios        | 27    | 93,103 |
| Tiempo productivo      | -     | 27     |
| Costos por combustible | -     | 39,62  |
| Costo por mano de obra | -     | 20,55  |

Nota: En relación al porcentaje del tiempo promedio de traslado, es respecto al tiempo total laboral (480 min) y de los costos es con respecto a los ingresos.

Asimismo, las distancias entre los puntos de suministro fueron convertidas a tiempos obtenidas con el SIG, estos se agregaron en las programaciones correspondientes a cada uno de los modelos matemáticos a emplear para el diseño de rutas que se muestra en la Fig. 3.

Fig. 3 Matriz de tiempos de desplazamiento.

### B. Modelo Matemático.

El modelo matemático empleado para el diseño óptimo de rutas de transporte para la empresa, busca minimizar el tiempo total recorrido de todos los vehículos mientras se cumplen con restricciones. A continuación, se define los índices, parámetros, variables de decisión y restricciones de modelo formulado.

#### INDICES

- $i$ : nodo de partida  $i \in \{0, 1, 2, \dots, 29\}; i = 0 \rightarrow$  Base
- $j$ : nodo de llegada  $j \in \{0, 1, 2, \dots, 29\}; j = 0 \rightarrow$  Base
- $k$ : índice de los vehículos  $k \in \{1, 2, \dots, 7\}$

#### PARÁMETROS

- $T_{ij}$ : tiempo entre el nodo  $i$  y el  $j$
- $Q_k$ : capacidad máxima de tiempo del vehículo  $k$
- $D_i$ : demanda del punto nodo  $i$
- $M$ : número máximo de vehículos disponibles

#### VARIABLES DE DECISIÓN

- $x_{ijk}$ : variable binaria que indica si el vehículo  $k$  viaja del nodo  $i$  al nodo  $j$  donde:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{si el vehículo } k \text{ viaja de } i \text{ a } j. \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

#### FUNCIÓN OBJETIVO:

$$\min \sum_{k=1}^7 \sum_{i=0}^{29} \sum_{j=0}^{29} T_{ij} x_{ijk} \tag{1}$$

#### RESTRICCIONES:

- $i$ . Cada punto de servicio es visitado exactamente una vez por un vehículo:

$$\sum_{k=1}^7 \sum_{j=0, j \neq i}^{29} x_{ijk} = 1, \quad \forall i \in \{1, \dots, 29\} \tag{2}$$

ii. Cada vehículo sale del depósito y regresa a él:

$$\sum_{j=1}^{29} x_{0jk} = 1, \quad \forall k \in \{1, \dots, 29\} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{29} x_{i0k} = 1, \quad \forall k \in \{1, \dots, 29\} \quad (4)$$

iii. Si un vehículo entra en un punto, debe salir de ese mismo punto:

$$\sum_{i=0}^{29} X_{ijk} = \sum_{j=0}^{29} x_{ijk} \quad \forall k \in \{1, \dots, 7\}, \forall j \in \{1, \dots, 29\} \quad (5)$$

iv. La capacidad del vehículo no debe ser excedida:

$$\sum_{i=1}^{29} D_i x_{ijk} \leq Q_k, \quad \forall k \in \{1, \dots, 29\} \quad (6)$$

v. Subtours son eliminados (restricciones de subtour):

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S, j \neq i} x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq V, 2 \leq |S| \leq 29 \quad (7)$$

vi. Variables binarias:

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad (8)$$

### C. Selección y Aplicación de Métodos de Optimización.

Para la selección de los métodos de optimización de rutas se fundamentó en un análisis multicriterio, considerando las especificaciones operativas y restricciones contextuales de la propias de la empresa. Tomando en cuenta a los autores Mendoza *et al* [25], la metodología de selección considerada fue el Proceso Analítico Jerárquico (AHP, Analytic Hierarchy Process), considerando siete criterios críticos de evaluación: eficiencia en la reducción de tiempos de recorrido (C1), escalabilidad a un gran número de nodos (C2), cumplimiento de restricciones de tiempo (C3), rapidez en la resolución (C4), simplicidad de resolución computacional (C5), flexibilidad ante condiciones dinámicas (C6), robustez y estabilidad (C7).

Los resultados de la aplicación AHP para los métodos de optimización se presentan en la Tabla III, donde se evidencia que las heurísticas del Ahorro, Barrido y Clusterización, junto con el Algoritmo Genético, obtuvieron las mayores ponderaciones con 14,36%, 13,74%, 13,03% y 12,00% respectivamente.

TABLA III  
EVALUACIÓN DE MODELOS DE DISEÑO DE RUTAS

| CRITERIO / TÉCNICAS           | C1   | C2   | C3   | C4   | C5   | C6   | C7   | Priorización |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|--------------|
| Modelo de Programación Lineal | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,21 | 0,21 | 0,02 | 0,03 | 10,16%       |
| Modelo VRP Clásico            | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,21 | 0,21 | 0,03 | 0,04 | 10,46%       |
| VRP con Ventanas de Tiempo    | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,21 | 0,21 | 0,07 | 0,07 | 8,43%        |

|                                   |      |      |      |      |      |      |      |               |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|---------------|
| Heurística del Ahorro             | 0,16 | 0,17 | 0,14 | 0,09 | 0,09 | 0,30 | 0,17 | <b>14,36%</b> |
| Heurística de Clusterización      | 0,14 | 0,16 | 0,14 | 0,09 | 0,09 | 0,14 | 0,17 | <b>13,03%</b> |
| Heurística del Barrido            | 0,17 | 0,16 | 0,14 | 0,09 | 0,09 | 0,14 | 0,17 | <b>13,74%</b> |
| Algoritmo Genético                | 0,13 | 0,14 | 0,26 | 0,05 | 0,04 | 0,14 | 0,17 | <b>12,00%</b> |
| Algoritmo de Colonias de Hormigas | 0,24 | 0,20 | 0,16 | 0,01 | 0,01 | 0,12 | 0,15 | 10,82%        |
| PONDERACIÓN                       | 0,27 | 0,19 | 0,09 | 0,29 | 0,07 | 0,03 | 0,03 | 1             |

Para validar AHP se efectuó mediante el cálculo del ratio de consistencia (RC), obteniéndose valores en el rango de 0,04 a 0,08 para la totalidad de criterios evaluados, confirmando que la matriz de comparación cumple con el umbral de aceptación establecido para AHP ( $RC \leq 0,10$ ) [26].

En consecuencia, los métodos seleccionados fueron implementados y evaluados en el problema de optimización de rutas de la empresa, dado que cada uno de ellos representa una estrategia distinta para la optimización de recorridos, lo que permite realizar un análisis comparativo integral de su desempeño, permitiendo una evaluación comparativa de su eficiencia en el contexto operativo específico de la empresa. La aplicación de los cuatro métodos se presenta a continuación.

#### i. Heurística de barrido

La heurística del barrido transforma las coordenadas de los puntos de entrega a un sistema de referencia polar con respecto al depósito, permitiendo ordenar los puntos según su ángulo polar y asignarlos secuencialmente a los vehículos [27]. En la investigación, este enfoque estructuró las rutas de manera geográficamente coherente, minimizando el tiempo total de recorrido y facilitando la asignación de los vehículos a zonas de cobertura bien definidas [28]. El funcionamiento del modelo se encuentra detallado en la Fig. 4.

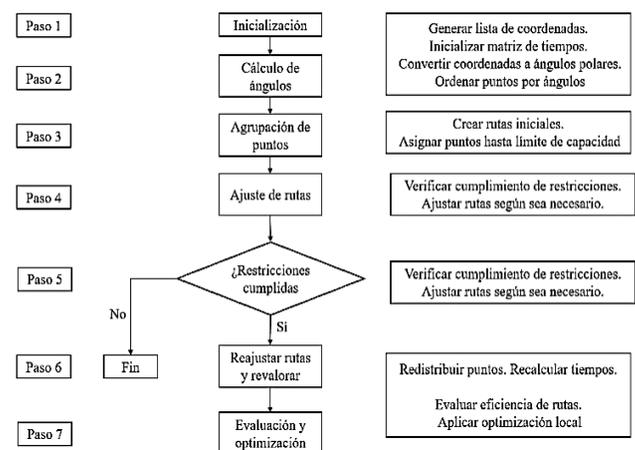


Fig. 4 Diagrama de flujo de la heurística de barrido

Los resultados obtenidos tras la ejecución del método de barrido utilizando Python, reflejan la asignación de rutas para un conjunto de vehículos con el objetivo de minimizar el tiempo total de recorrido. Las rutas generadas son las siguientes:

- Vehículo 1: Ruta: ['PSS21', 'PSS28', 'PSS2', 'PSS7', 'PSS18']
- Vehículo 2: Ruta: ['PSS9', 'PSS13', 'PSS12', 'PSS20']
- Vehículo 3: Ruta: ['PSS24', 'PSS19', 'PSS3']
- Vehículo 4: Ruta: ['PSS8', 'PSS1', 'PSS27']
- Vehículo 5: Ruta: ['PSS23', 'PSS6', 'PSS22', 'PSS16', 'PSS14', 'PSS15', 'PSS17']
- Vehículo 6: Ruta: ['PSS11', 'PSS25', 'PSS5', 'PSS4']
- Vehículo 7: Ruta: ['PSS26', 'PSS10', 'PSS29']

Estos resultados graficados en la Fig. 5, muestran una distribución eficiente de las rutas, donde cada vehículo respeta las restricciones de tiempo máximas establecidas, garantizando así una operación logística óptima y equilibrada.

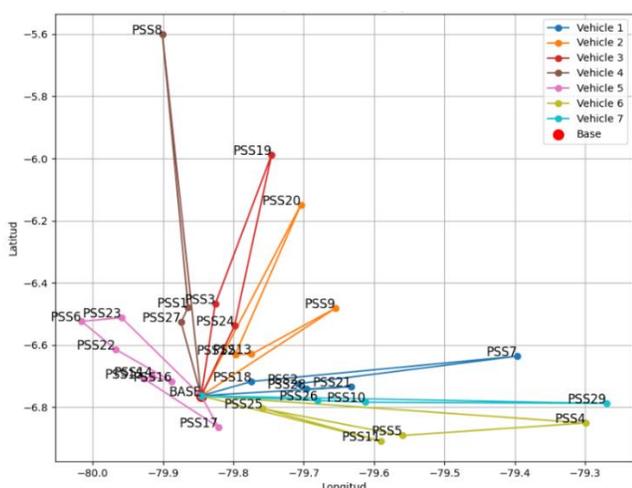


Fig. 5 Distribución de la heurística de barrido

Con los resultados obtenidos se elabora la siguiente Tabla IV para medir los indicadores de desempeños establecidos.

TABLA IV  
RESUMEN DE LOS RESULTADOS HEURÍSTICA DE BARRIDO

| Cuadrilla | Distancia (km) | Tiempo (min) | Costo combustible (\$) | Costo mano de obra (\$) | Ingresos (\$) |
|-----------|----------------|--------------|------------------------|-------------------------|---------------|
| 1         | 152,8          | 425          | 46,05                  | 33,23                   | 245,99        |
| 2         | 231,9          | 443          | 69,89                  | 33,23                   | 160,68        |
| 3         | 241,9          | 449          | 72,91                  | 33,23                   | 120,12        |
| 4         | 247,0          | 454          | 74,44                  | 33,23                   | 196,62        |
| 5         | 125,5          | 469          | 37,82                  | 33,23                   | 229,75        |
| 6         | 226,0          | 437          | 68,12                  | 33,23                   | 98,20         |
| 7         | 181,4          | 365          | 54,67                  | 33,23                   | 176,82        |
| TOTAL     | 1406,5         | 3042         | 423,91                 | 232,62                  | 1228,19       |

Estos resultados fueron obtenidos en base a la ejecución de la programación en Python, se destaca que los tiempos, ahora consideran el del servicio realizado en cada punto

## ii. Heurística del ahorro

La heurística de ahorro, basada en el método de Clarke y Wright, optimiza la distribución al calcular los ahorros en costos de viaje derivados de la fusión de rutas individuales [28]. En la investigación, este procedimiento mejoró la eficiencia operativa al reducir los tiempos de recorrido y los costos de transporte, respetando las restricciones de capacidad vehicular y asegurando una asignación óptima de los recursos [29].

El funcionamiento del modelo se encuentra detallado en la Fig. 6.

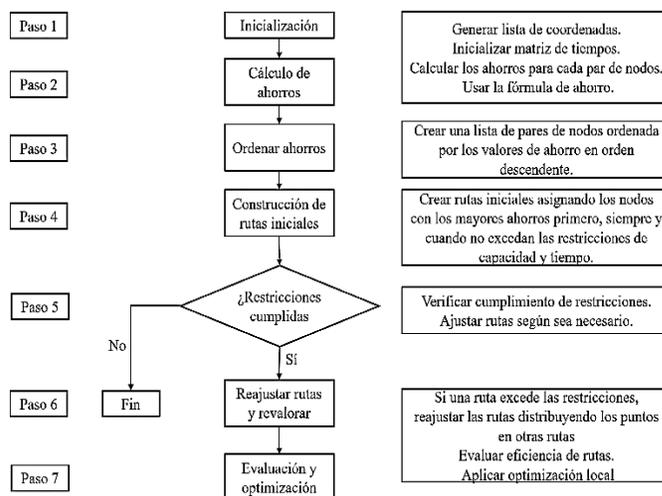


Fig. 6 Diagrama de flujo de la heurística del ahorro

Los resultados obtenidos de la implementación de la heurística de ahorro utilizando Python, muestran la asignación eficiente de rutas para los vehículos con sus respectivos tiempos de recorrido. A continuación, se detallan las rutas generadas para cada vehículo, asegurando que ninguna exceda el tiempo máximo permitido de 480 minutos:

- Vehículo 1 ruta: [PSS1, PSS3, PSS9, PSS24]
- Vehículo 2 ruta: [PSS2, PSS4, PSS29]
- Vehículo 3 ruta: [PSS5, PSS11, PSS25, PSS26]
- Vehículo 4 ruta: [PSS6, PSS23, PSS27, PSS14, PSS15, PSS16, PSS17]
- Vehículo 5 ruta: [PSS7, PSS10, PSS21, PSS28]
- Vehículo 6 ruta: [PSS8, PSS19, PSS20]
- Vehículo 7 ruta: [PSS12, PSS22, PSS13, PSS18]

Estos resultados graficados en la Fig. 7, demuestran que la heurística de ahorro ha distribuido eficazmente los puntos de entrega entre los vehículos disponibles, manteniendo los tiempos de recorrido dentro de los límites establecidos y optimizando el uso de los recursos disponibles.

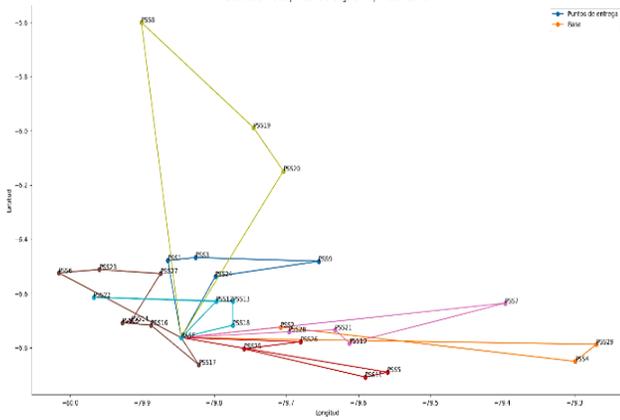


Fig. 7 Distribución de la heurística del ahorro

TABLA V  
RESUMEN DE LOS RESULTADOS HEURÍSTICA DEL AHORRO

| Cuadrilla | Distancia (km) | Tiempo (min) | Costo combustible (\$) | Costo mano de obra (\$) | Ingresos (\$) |
|-----------|----------------|--------------|------------------------|-------------------------|---------------|
| 1         | 141,8          | 343          | 42,07                  | 33,23                   | 175,10        |
| 2         | 193,9          | 360          | 57,53                  | 33,23                   | 176,82        |
| 3         | 129,5          | 325          | 38,42                  | 33,23                   | 152,57        |
| 4         | 129,0          | 477          | 38,28                  | 33,23                   | 249,56        |
| 5         | 140,1          | 340          | 41,57                  | 33,23                   | 128,01        |
| 6         | 311,0          | 449          | 92,27                  | 33,23                   | 96,62         |
| 7         | 110,8          | 294          | 32,88                  | 33,23                   | 162,93        |
| TOTAL     | 1156,1         | 2588         | 343,01                 | 232,62                  | 1228,19       |

Estos resultados fueron obtenidos en base a la programación.

### iii. Heurística de clusterización

La heurística de clusterización, aplicada en el estudio mediante el método K-means, permitió la formación de grupos de puntos de entrega geográficamente cercanos, asegurando que cada cluster fuera atendido por un único vehículo [28]. Esta estrategia optimizó la distribución al minimizar el tiempo total requerido y garantizar que cada unidad operara dentro de sus restricciones de tiempo y capacidad, mejorando así la eficiencia del sistema logístico [30]. El funcionamiento del modelo se encuentra detallado en la siguiente Fig. 8.

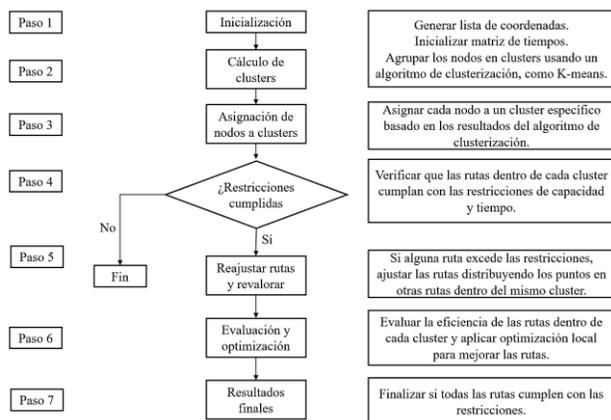


Fig. 8 Diagrama de flujo de la heurística de clusterización

Los resultados obtenidos de la terminal de visual Studio Code para la heurística de clusterización muestran las rutas asignadas a cada vehículo, junto con el tiempo total de recorrido de cada ruta. El tiempo de recorrido máximo permitido para cada vehículo es de 480 minutos. A continuación, se presentan las rutas optimizadas para cada uno de los siete vehículos:

- Vehículo 1: Ruta ['PSS2', 'PSS5', 'PSS10', 'PSS11', 'PSS24']
- Vehículo 2: Ruta ['PSS1', 'PSS3', 'PSS9', 'PSS18', 'PSS21']
- Vehículo 3: Ruta ['PSS8', 'PSS26']
- Vehículo 4: Ruta ['PSS19', 'PSS20', 'PSS27', 'PSS28']
- Vehículo 5: Ruta ['PSS12', 'PSS13', 'PSS14', 'PSS15', 'PSS16', 'PSS17', 'PSS25']
- Vehículo 6: Ruta ['PSS4', 'PSS7']
- Vehículo 7: Ruta ['PSS6', 'PSS22', 'PSS23']

Estos resultados graficados en la Fig. 9, reflejan la eficiencia del método de clusterización para distribuir las entregas entre los vehículos disponibles, respetando las restricciones de tiempo establecidas para cada ruta.

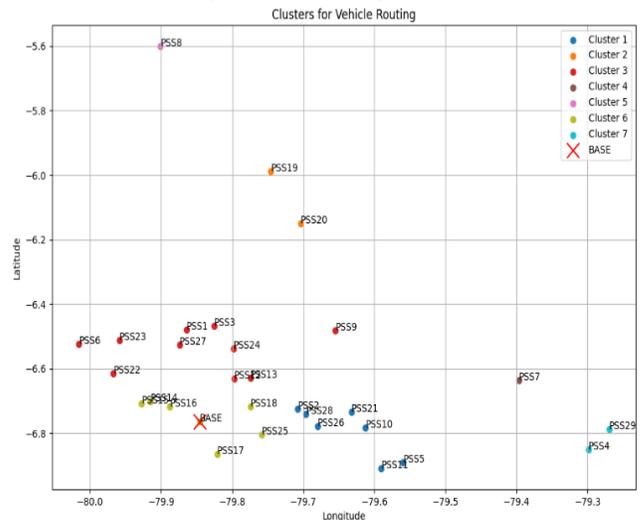


Fig. 9 Distribución de la heurística de clusterización

TABLA VI  
RESUMEN DE LOS RESULTADOS HEURÍSTICA DE CLUSTERIZACIÓN

| Cuadrilla | Distancia (km) | Tiempo (min) | Costo combustible (\$) | Costo mano de obra (\$) | Ingresos (\$) |
|-----------|----------------|--------------|------------------------|-------------------------|---------------|
| 1         | 153,2          | 457          | 45,75                  | 33,23                   | 259,83        |
| 2         | 201,7          | 466          | 60,23                  | 33,23                   | 202,62        |
| 3         | 306,4          | 476          | 91,50                  | 33,23                   | 138,56        |
| 4         | 195,2          | 439          | 58,29                  | 33,23                   | 84,20         |
| 5         | 143,3          | 452          | 42,79                  | 33,23                   | 268,37        |
| 6         | 207,5          | 433          | 61,97                  | 33,23                   | 74,54         |
| 7         | 211,1          | 397          | 63,04                  | 33,23                   | 132,76        |
| TOTAL     | 1 418,4        | 3120         | 423,57                 | 232,62                  | 1228,19       |

Estos resultados fueron obtenidos en base a la recopilación de la data perteneciente al escenario que se describe.

#### iv. Algoritmo genético

El algoritmo genético, implementado como un mecanismo de optimización basado en principios evolutivos, permitió explorar múltiples configuraciones de rutas mediante procesos de selección, cruce y mutación [31]. Su aplicación en la investigación facilitó la obtención de soluciones óptimas en términos de minimización de costos y tiempos de recorrido, contribuyendo a la viabilidad económica del sistema mediante la mejora progresiva de las rutas de distribución [32].

El funcionamiento del modelo se encuentra detallado en la Fig. 10.

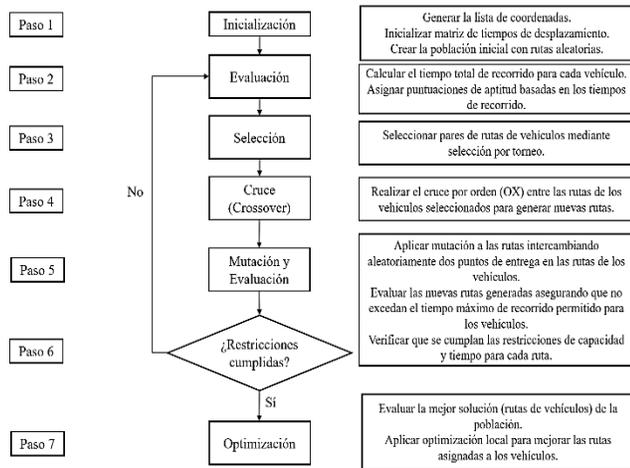


Fig 10 Diagrama de flujo del algoritmo genético

Los resultados obtenidos de la terminal de visual Studio Code para el algoritmo genético muestran las rutas asignadas a cada vehículo, junto con el tiempo total de recorrido de cada ruta. El tiempo de recorrido máximo permitido para cada vehículo es de 480 minutos. A continuación, se presentan las rutas optimizadas para cada uno de los siete vehículos:

- Vehículo 1: Ruta ['PSS8', 'PSS27']
- Vehículo 2: Ruta ['PSS26', 'PSS10', 'PSS21', 'PSS7', 'PSS28']
- Vehículo 3: Ruta ['PSS9', 'PSS24', 'PSS13', 'PSS25', 'PSS17']
- Vehículo 4: Ruta ['PSS15', 'PSS16', 'PSS23', 'PSS3', 'PSS18']
- Vehículo 5: Ruta ['PSS2', 'PSS12', 'PSS14', 'PSS6', 'PSS22']
- Vehículo 6: Ruta ['PSS29', 'PSS4', 'PSS5', 'PSS11']
- Vehículo 7: Ruta ['PSS1', 'PSS19', 'PSS20']

Estos resultados graficados en la Fig. 11, reflejan la eficiencia del algoritmo genético para distribuir las entregas entre los vehículos disponibles, respetando las restricciones de tiempo establecidas para cada ruta.

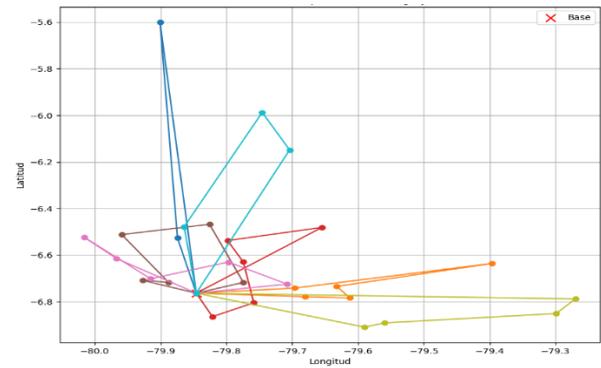


Fig. 11 Gráfico de la distribución del algoritmo genético

TABLA VII  
RESUMEN DE LOS RESULTADOS ALGORITMO GENÉTICO

| Cuadrilla | Distancia (km) | Tiempo (min) | Costo combustible (\$) | Costo mano de obra (\$) | Ingresos (\$) |
|-----------|----------------|--------------|------------------------|-------------------------|---------------|
| 1         | 310,1          | 392          | 92,01                  | 33,23                   | 119,56        |
| 2         | 145,6          | 386          | 43,20                  | 33,23                   | 205,07        |
| 3         | 151,0          | 401          | 44,80                  | 33,23                   | 198,12        |
| 4         | 137,5          | 386          | 35,22                  | 33,23                   | 172,11        |
| 5         | 150,4          | 374          | 44,62                  | 33,23                   | 262,90        |
| 6         | 194,1          | 391          | 57,59                  | 33,23                   | 132,76        |
| 7         | 214,4          | 379          | 63,61                  | 33,23                   | 182,21        |
| TOTAL     | 1303,1         | 2709         | 381,05                 | 232,62                  | 1228,19       |

Estos resultados fueron obtenidos en base a la recopilación de la data perteneciente al escenario que se describe.

#### D. Comparación de Métodos de Optimización Aplicados

Luego de la aplicación de los cuatro métodos: heurística de barrido, heurística del ahorro, heurística de clusterización y algoritmo genético, se compararon los indicadores de desempeño que se muestran en la Tabla VIII.

TABLA VIII  
COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS

| INDICADOR                      | BARRIDO  | AHORRO   | CLUSTER. | GENÉTICO |
|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Ingresos (\$)                  | 1 215,13 | 1 215,13 | 1 215,13 | 1 215,13 |
| Costo mano de obra (\$)        | 230,15   | 230,15   | 230,15   | 230,15   |
| Costo de combustible (\$)      | 419,40   | 339,37   | 419,06   | 377,00   |
| n° de servicios realizados     | 29       | 29       | 29       | 29       |
| Tiempos de traslado (promedio) | 279,6    | 214,7    | 290,7    | 232      |
| Distancia recorrida            | 1 406,5  | 1 156,1  | 1 418,4  | 1 303,1  |
| Tiempo de resolución (seg.)    | 0,1      | 9        | 21       | 118      |

De acuerdo con los datos de la Tabla VIII, los métodos analizados presentan los mismos ingresos \$ 1 215,13 y costos de mano de obra \$ 230,15. Sin embargo, se observan diferencias significativas en otros indicadores clave que se describen a continuación:

- i. Costos de combustible: El método de ahorro tiene el menor costo (\$ 339,37), seguido por el algoritmo genético (\$ 377,00) mientras que los modelos de barrido \$ 419,40 y clusterización (\$ 419,06) tienen costos similares y más elevados.
- ii. Tiempos de traslado promedio: El método del ahorro destaca al reducir el tiempo a 214,7 minutos, superando significativamente al modelo de clusterización (290,7 minutos), al modelo de barrido (279,6 minutos) y al algoritmo genético (232 minutos).
- iii. Distancia recorrida: El método del ahorro también logra la menor distancia recorrida, con 1 156,1 km, mientras que el modelo de clusterización (1 418,4 km), el modelo de barrido (1 406,5 km) y el algoritmo genético (1 303,1 km) presentan mayores recorridos.

En función de los resultados obtenidos, la heurística del ahorro resulta ser la más eficiente en términos operativos y económicos. Aunque los modelos de clusterización y barrido también ofrecen mejoras respecto al escenario inicial, el método del ahorro proporciona el mejor balance entre reducción de costos y optimización del servicio.

En consecuencia, en la Tabla IX se presenta un resumen comparativo de los indicadores clave de la empresa antes y después de la implementación de la heurística del ahorro. Los valores obtenidos corresponden a datos operativos reales previos a la optimización, contrastados con los resultados obtenidos tras la aplicación del modelo propuesto. Este análisis permite cuantificar el impacto del método en términos de costos, ingresos y eficiencia operativa, proporcionando una visión integral de las mejoras logradas.

TABLA IX  
ANÁLISIS GENERAL

| CRITERIO                    | SIN PROPUESTA | CON PROPUESTA |        |
|-----------------------------|---------------|---------------|--------|
|                             | Valor (\$)    | Valor (\$)    | Δ%     |
| Ingresos                    | 677 188,95    | 711 973,55    | +5     |
| Costo de combustible        | 282 116,78    | 220 966,54    | -27,1  |
| Costos mano de obra         | 93 312        | 87 682,50     | -14,1  |
| Costos alquiler             | 97 977,60     | 97 977,60     | -      |
| Otros gastos                | -             | 51 255,05     | -      |
| % de capacitación           | 0%            | 100%          | -      |
| % de utilización            | 0%            | 100%          | -      |
| <b>Eficiencia Operativa</b> | 123,33 %      | 146,18%       | +18,52 |

Los resultados obtenidos muestran una mejora significativa en los indicadores de desempeño tras la implementación de la heurística del ahorro.

## CONCLUSIONES

El diagnóstico inicial de las operaciones de transporte en esta empresa permitió identificar deficiencias operativas significativas. Se determinó que los tiempos productivos de los técnicos de las cuadrillas en las sucursales alcanzaban solo el 57%, mientras que los costos de transporte representaban el 39,62% de los ingresos y un incremento alto del 14.28% en costos por horas extras.

Tras realizar una evaluación comparativa entre diversos modelos de rutas de transporte como las heurísticas de ahorro, clusterización, barrido y la metaheurística de algoritmo genético, se determinó que la heurística de ahorro proporcionaba los resultados más favorables para la organización. La implementación de esta estrategia generó un incremento del 5,1% en los ingresos y eliminó completamente los costos por horas extras que anteriormente representaban el 14,28%. Adicionalmente, los gastos de combustible se redujeron del 39,62% al 30% de los ingresos, lo que supone una disminución del 21,7%. Como beneficios adicionales, se logró eliminar los servicios desatendidos y reducir los tiempos de traslado en un 33%.

La aplicación de la heurística de ahorro en el diseño de rutas resultó en una mejora sustancial de la eficiencia operativa en la prestación de servicios eléctricos, incrementándola de 123,33% a 146,18%, lo que representa un aumento del 18,52%. Este enfoque, seleccionado después de un análisis comparativo exhaustivo de diversos modelos de ruteo, demostró ser la solución óptima al proyectar reducciones significativas en costos operativos y un incremento en los ingresos.

Este estudio aporta un marco metodológico riguroso para la optimización de rutas en el sector eléctrico peruano donde la heurística del ahorro supera significativamente a otros métodos evaluados y aunque no se ha realizado validación experimental en terreno, los modelos fueron validados con datos operativos reales procesados en Python, proporcionando así un fundamento sólido para recomendaciones prácticas como capacitación e integración de sistemas SIG, por lo que se sugiere implementar un programa piloto para confirmar los beneficios in situ y desarrollar enfoques adaptados a las dinámicas específicas de la región Lambayeque.

## AGRADECIMIENTO

Agradecemos a los funcionarios de la empresa Mabara Contratistas Generales S.C.R.L. por dar las facilidades y brindar la información para el desarrollo de la presente investigación.

## REFERENCIAS

- [1] S. Arora, W. Böhm, K. Dolan, R. Gould, and S. McConnell, "February 2020." Accessed: Oct. 19, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.mckinsey.com/~/media/McKinsey/Business%20Functions/Operations/Our%20Insights/Resilience%20in%20transport%20and%20logistics/Resilience-in-transport-and-logistics-02-20.pdf>
- [2] ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, "SCORE Perú con evidencias contundentes: una herramienta eficaz para incrementar la productividad y la formalización en las empresas | International Labour Organization," [www.ilo.org](http://www.ilo.org), Dec. 09, 2021. Disponible en: <https://www.ilo.org/es/resource/news/score-peru-con-evidencias-contundentes-una-herramienta-eficaz-para>
- [3] L. R. F. Q and J. O. B. P, "Determinación de costos operativos y su incidencia en la rentabilidad económica y financiera de las empresas de transportes urbano de pasajeros de la ciudad de Puno – Perú," *Actualidad Contable Faces*, vol. 24, no. 43, pp. 76–92, 2021. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/257/25769354004/html/>
- [4] GOBIERNO DEL PERÚ, "LAMBAYEQUE Plan Regional Exportador," Ministerio de Comercio Exterior y Turismo del Perú. Disponible en: [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/354506/PERX\\_LAMBAYEQUE.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/354506/PERX_LAMBAYEQUE.pdf)
- [5] Hernández Sampieri, Fernández Collado, and Baptista Lucio, "Account Suspended," [www.uca.ac.cr](http://www.uca.ac.cr), 2014. Disponible en: <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- [6] Cesar Arias Bernal, "Metodología de la investigación," ABACO RED, 2014. Disponible en: <https://abacoenred.com/wp-content/uploads/2019/02/El-proyecto-de-investigacion-C3%B3n-F.G.-Arias-2012-pdf.pdf>
- [7] H. Paz Orozco, I. Flórez Burbano, and Y. León Campo, "Aplicación de un método heurístico y modelación matemática para el diseño de rutas vehiculares en la empresa Eco Urban S.A de la ciudad de Toluca Estado de México," *Publicaciones e Investigación*, vol. 14, no. 1, Jan. 2020, <https://doi.org/10.22490/25394088.3835>
- [8] J. I. Frómata Moya and J. de J. Pérez Campos, "Modelo heurístico híbrido para el ruteo vehicular y manejo de inventario en una entidad comercializadora de combustibles," *REVISTA DE MÉTODOS CUANTITATIVOS PARA LA ECONOMÍA Y LA EMPRESA*, pp. 363–383, Dec. 2020, [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.46661/revmetodoscuanteconempresa.3574>
- [9] C. A. López-Ayala, W. Jurado-Valbuena, and E. R. López-Santana, "Proposal of a Dynamic Algorithm for the Maintenance and Vehicle Routing Problem with Time Windows," *Ingeniería*, vol. 26, no. 3, pp. 436–449, Sep. 2021, doi: <https://doi.org/10.14483/23448393.18482>
- [10] M. A. Mora Castellanos, C. A. Tinajero Naranjo, and M. X. Cevallos Andrade, "Propuesta metodológica para el diseño de flotas de transporte desde el enfoque del problema de ruteo de vehículos," *REVISTA ERUDITUS*, vol. 4, no. 2, pp. 59–77, Jun. 2023, doi: <https://doi.org/10.35290/re.v4n2.2023.788>
- [11] D. A. Haro Avalos, M. A. Avalos Pérez, A. S. Mantilla Miranda, and M. C. Avalos Pérez, "Food Waste Collection Management using the Vehicle Routing Problem method: approach in Riobamba - Ecuador," *Revista Venezolana de Gerencia*, vol. 29, no. 12, pp. 1099–1111, Dec. 2024, doi: <https://doi.org/10.52080/rvgluz.29.e12.14>
- [12] J. A. Zapata Cortes, Á. R. Vélez Bedoya, and M. D. Arango-Serna, "Mejora del proceso de distribución en una empresa de transporte," *Investigación Administrativa*, vol. 49, no. 126, pp. 1–16, Dec. 2020, [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.35426/iav49n126.08>
- [13] P. Leonardo and R. Quintana, "Resolución de un Problema de Rutas de Vehículos que presenta Restricciones difusas Solving a Vehicle Routing Problem with Fuzzy Constraints," *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, vol. 16, no. 2, pp. 15–30, Jun. 2022, [Online]. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2227-18992022000200015](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2227-18992022000200015)
- [14] J. Ruiz-Meza, "Problema de ruteo de vehículos multi-objetivo con entregas y recogidas simultáneas y minimización de emisiones A multi-objective vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery and minimization of emissions," *Ingeniare*, vol. 29, no. 3, pp. 435–449, 2021. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052021000300435>
- [15] D. E. Sánchez and E. Gutiérrez, "Aplicación de la p-mediana y ruteo de vehículos para la reducción de distancias en una empresa de servicio postal," *Información tecnológica*, vol. 33, no. 1, pp. 121–130, Feb. 2022, doi: <https://doi.org/10.4067/s0718-07642022000100121>
- [16] W. D. Urango, H. E. Hernández, and J. M. López, "Capacitated location routing problem solved by using the spotted hyena optimizer," *Informacion Tecnologica*, vol. 31, no. 2, pp. 195–205, Apr. 2020, doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000200195>
- [17] "Google Maps," Google Maps. <https://www.google.com/maps/@-6.7849275>. Disponible en: <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=20893&tip=sid&clean=0>
- [18] P. Cuadra and P. Torres, "Diseño de optimización de rutas de transporte para incrementar la rentabilidad", 2017. Disponible en: <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/11651/Prada%20Cuadra%20Gustavo%20Anselmo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [19] W. Chilón Huatay, "Sistema de optimización de transportes para minimizar costos de distribución de materiales de construcción en nor andes s.a.c. cajamarca, 2022," REPOSITORIO UPN, 2023. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/36015/Chil%C3%B3n%20Huatay%20c%20William.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [20] T. R. Damayanti, A. Kusumaningrum, S. S. Islam, and Y. Dwi, "Route Optimization Using Saving Matrix Method -A Case Study at Public Logistics Company in Indonesia," RESEARCHGATE, Sep. 2020. [https://www.researchgate.net/publication/344471738\\_Route\\_Optimization\\_Using\\_Saving\\_Matrix\\_Method\\_-\\_A\\_Case\\_Study\\_at\\_Public\\_Logistics\\_Company\\_in\\_Indonesia](https://www.researchgate.net/publication/344471738_Route_Optimization_Using_Saving_Matrix_Method_-_A_Case_Study_at_Public_Logistics_Company_in_Indonesia)
- [21] A. Sulemana, E. A. Donkor, E. K. Forkuo, and S. Oduro-Kwarteng, "Optimal Routing of Solid Waste Collection Trucks: A Review of Methods," *Journal of Engineering*, vol. 2018, pp. 1–12, Oct. 2018, doi: <https://doi.org/10.1155/2018/4586376>
- [22] Ö. Apaydin, "Route optimization for solid waste collection: Trabzon (Turkey) case study," RESEARCHGATE, Sep. 2019. [https://www.researchgate.net/profile/Oemer-Apaydin-2/publication/229004015\\_Route\\_optimization\\_for\\_solid\\_waste\\_collectio\\_n\\_T](https://www.researchgate.net/profile/Oemer-Apaydin-2/publication/229004015_Route_optimization_for_solid_waste_collectio_n_T)
- [23] A. S. Alberca, "La librería Pandas," Aprende con Alf. <https://aprendeconalf.es/docencia/python/manual/pandas/>
- [24] NUMPY, "NumPy — NumPy," Numpy.org, Aug. 18, 2024. <https://numpy.org>
- [25] W3Schools, "Matplotlib Pyplot," [www.w3schools.com](http://www.w3schools.com). [https://www.w3schools.com/python/matplotlib\\_pyplot.asp](https://www.w3schools.com/python/matplotlib_pyplot.asp)
- [26] Mendoza, C. Solano, D. Palencia, and D. Garcia, "Application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) for decision-making with expert judgment," *Ingeniare*, vol. 27, no. 3, pp. 348–360, 2019. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052019000300348>
- [27] N. González and PrevenControl, "AHP: un método para fortalecer la toma de decisiones en SST," *PrevenControl*, Apr. 23, 2019. <https://prevencontrol.com/prevenblog/ahp-un-metodo-para-fortalecer-la-toma-de-decisiones-en-sst/>
- [28] G. V. Roger and R. M. José, "Investigación de operaciones en acción: Heurísticas para la solución de TSP," Repositorio Universidad Autónoma de Nuevo León. [http://eprints.uanl.mx/10030/1/9\\_Roger\\_Rios\\_et\\_al\\_Investigacion\\_de\\_oper.pdf](http://eprints.uanl.mx/10030/1/9_Roger_Rios_et_al_Investigacion_de_oper.pdf)
- [29] J. M. Solomon, "Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints," *Operations Research*, vol. 35, no. 2, pp. 254–265, Mar. 1987.
- [30] G. Clarke and J. W. Wright, "Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points," *Operations Research*, vol. 12, no. 4, pp. 568–581, Jul. 1964.
- [31] G. Laporte, "The Clustered Traveling Salesman Problem: A Review," *European Journal of Operational Research*, vol. 72, no. 3, pp. 443–458, Feb. 1994.
- [32] J. Moreno, "Metaheurísticas: Concepto y Propiedades." Available: <https://www.yumpu.com/es/document/read/14337090/metaheuristicas-concepto-y-propiedades-ulpgc>
- [33] CONOGASI, "Algoritmos genéticos," Conogasi, Sep. 21, 2018. <https://conogasi.org/articulos/algoritmos-geneticos/>