

# Comparación de Técnicas Metaheurísticas para el PCARP

Derlis Rolando Gómez Fernández

Universidad Nacional de Asunción, Facultad Politécnica

03 de Noviembre de 2024

## Resumen

En este trabajo se aborda el Problema de Enrutamiento de Arcos con Capacidad (CARP), enfocándose específicamente en su variante periódica (PCARP), que implica la optimización de rutas para vehículos con capacidad limitada. El estudio evalúa técnicas metaheurísticas avanzadas: **Simulated Annealing (SA)**, **Invasive Weed Optimization (IWO)** y **Variable Neighborhood Search (VNS)**. Se evaluó el desempeño de cada algoritmo en términos de costo de las rutas y eficiencia computacional en tres regiones de Paraguay, buscando identificar el enfoque más efectivo para esta variante. Los resultados destacaron que Simulated Annealing demostró un rendimiento superior en la minimización de costos, aunque con tiempos de ejecución mayores en regiones más extensas.

## Introducción

El Problema de Enrutamiento de Arcos con Capacidad (CARP) es un desafío combinatorio crucial en la logística y el transporte, que exige la optimización eficiente de rutas bajo restricciones de capacidad. Sus aplicaciones abarcan desde la recolección de residuos hasta la distribución de suministros, donde la reducción de costos operativos y la mejora de la eficiencia en las rutas es fundamental. Este estudio revisa la aplicabilidad y la eficiencia de enfoques metaheurísticos en la solución del PCARP, una variante que enfatiza la minimización de costos periódicos.

## Metodología

Se seleccionaron tres algoritmos metaheurísticos basados en una revisión exhaustiva de la literatura:

- Simulated Annealing (SA)**: Inspirado en el proceso físico de enfriamiento de metales, explora soluciones de forma iterativa, aceptando soluciones subóptimas con una probabilidad decreciente para evitar óptimos locales.
- Invasive Weed Optimization (IWO)**: Algoritmo inspirado en la naturaleza que modela el comportamiento de colonización de las malezas, conocido por su capacidad de búsqueda global robusta.
- Variable Neighborhood Search (VNS)**: Enfoque sistemático que alterna entre diferentes estructuras de vecindad para encontrar mejores soluciones y evitar óptimos locales.

Los experimentos se llevaron a cabo en las regiones de *Maramburé*, *Luque*, *Lambaré* y *Mariano Roque Alonso* en Paraguay. Se utilizó una computadora **Asus ROG Zephyrus** con **16 GB de RAM**, **procesador Intel Core i7 de 9ª generación** y una **GPU RTX 2030**, empleando **Python** y **PyCharm 2024.2.4 (Professional Edition)** como herramientas de desarrollo.

## Resultados

Se evaluaron los tres algoritmos en las tres regiones mencionadas, con diferentes configuraciones de vehículos y capacidades.

### Maramburé, Luque

Se realizaron cinco simulaciones para cada algoritmo con **3 vehículos** y **capacidad de 600**. Los resultados promedio fueron:

**Simulated Annealing (SA)** obtuvo un costo promedio de ruta de **6,541.4** y un tiempo de ejecución promedio de **14.26 segundos**.

**Invasive Weed Optimization (IWO)** alcanzó un costo promedio de ruta de **82,729.4** y un tiempo de ejecución promedio de **59.20 segundos**.

**Variable Neighborhood Search (VNS)** presentó un costo promedio de ruta de **87,693.8** y un tiempo de ejecución promedio de **576.01 segundos**.

#### Observaciones:

- **SA** fue eficiente, generando rutas de menor costo en tiempos competitivos.
- **IWO** presentó costos mayores, cubriendo más completamente el área.
- **VNS** tuvo el mayor costo y tiempos de ejecución más prolongados.

### Lambaré

Se realizaron simulaciones con **10 vehículos** y **capacidad de 1200**. Los resultados fueron:

**Simulated Annealing (SA)** obtuvo un costo de ruta de **12,672** y un tiempo de ejecución de **4,075 segundos**.

**Invasive Weed Optimization (IWO)** alcanzó un costo de ruta de **1,680,772** y un tiempo de ejecución de **3,719 segundos**.

**Variable Neighborhood Search (VNS)** presentó un costo de ruta de **2,707,162** y un tiempo de ejecución de **274.8 segundos**.

#### Observaciones:

- **SA** generó rutas de bajo costo, aunque con un tiempo de ejecución elevado.

- **IWO** produjo rutas con mayor cobertura espacial pero a un costo significativamente mayor.
- **VNS** tuvo el mayor costo pero fue el más rápido en términos de tiempo de ejecución.

### Mariano Roque Alonso

Se realizaron simulaciones con **10 vehículos** y **capacidad de 1200**. Los resultados fueron:

**Simulated Annealing (SA)** obtuvo un costo de ruta de **13,099** y un tiempo de ejecución de **4,744.29 segundos**.

**Invasive Weed Optimization (IWO)** alcanzó un costo de ruta de **1,889,618** y un tiempo de ejecución de **3,666 segundos**.

**Variable Neighborhood Search (VNS)** presentó un costo de ruta de **3,297,339** y un tiempo de ejecución de **212 segundos**.

#### Observaciones:

- **SA** produjo rutas de menor costo, aunque con mayor tiempo de ejecución.
- **IWO** generó rutas con mayor cobertura, resultando en costos más altos.
- **VNS** tuvo el costo más elevado pero fue el más rápido en ejecución.

## Discusión

Los resultados obtenidos demuestran que el **Simulated Annealing (SA)** fue el algoritmo más eficiente en términos de minimización de costos en todas las regiones evaluadas. Sin embargo, se observó que en regiones más grandes como Lambaré y Mariano Roque Alonso, el tiempo de ejecución del SA aumentó significativamente.

El **Invasive Weed Optimization (IWO)** generó rutas con mayor costo, pero con una cobertura más completa de las aristas con demanda, debido a su enfoque en llenar el espacio disponible hasta agotar la capacidad de los vehículos. Este enfoque resultó en tiempos de ejecución menores que los del SA en las regiones más grandes.

El **Variable Neighborhood Search (VNS)** produjo rutas con los costos más altos, pero fue el algoritmo más rápido en términos de tiempo

de ejecución en las regiones más grandes. Esto indica que, aunque VNS es eficiente computacionalmente, su capacidad para optimizar costos es menor en comparación con SA e IWO.

Estas diferencias resaltan cómo cada algoritmo, en la práctica, prioriza distintos aspectos: aunque todos los algoritmos tenían como objetivo minimizar el costo total de las rutas, el SA se enfocó en minimizar costos, el IWO en maximizar la cobertura de las aristas con demanda, y el VNS en reducir el tiempo de cómputo.

# Conclusión

El análisis comparativo demuestra que, en las implementaciones realizadas, el **Simulated Annealing (SA)** sobresalió como la opción más favorable para resolver el PCARP en las regiones evaluadas, debido a su capacidad de encontrar soluciones de menor costo, aunque a costa de mayores tiempos de ejecución en regiones más grandes.

El **Invasive Weed Optimization (IWO)** es adecuado cuando se busca una cobertura más completa de las aristas con demanda, aceptando costos más altos. El **Variable Neighborhood Search (VNS)** puede ser útil cuando se requiere rapidez en la obtención de soluciones, aunque las rutas resultantes puedan no ser las más óptimas en términos de costo.

Estos resultados resaltan la importancia de seleccionar el algoritmo adecuado según las prioridades específicas del problema, ya sea minimización de costos, cobertura completa de demandas o tiempos de respuesta rápidos.

# Referencias

- Hess, C., Dragomir, A. G., Doerner, K. F., Vigo, D. (2024). *Waste Collection Routing: A Survey on Problems and Methods*. Central European Journal of Operations Research, 32, 399–434.
- Tirkolaee, E. B., Goli, A., Güntmen, S., Weber, G.-W., Szwedzka, K. (2023). *A Novel Model for Sustainable Waste Collection Arc Routing Problem: Pareto-Based Algo-*

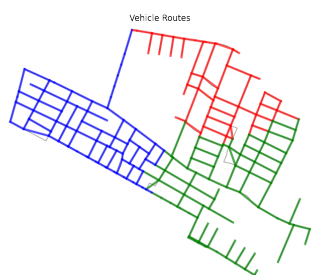
*rithms*. Annals of Operations Research, 324, 189–214.

- Tirkolaee, E. B., Goli, A., Pahlevan, M., Kordestanizadeh, R. M. (2019). *A Robust Bi-Objective Multi-Trip Periodic Capacitated Arc Routing Problem for Urban Waste Collection Using a Multi-Objective Invasive Weed Optimization*. Waste Management & Research, 37(1–13).

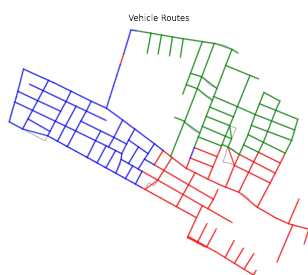
# Anexos

## Anexo 1: Visualización de las rutas

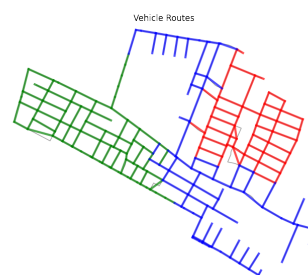
A continuación, se presentan las imágenes de las rutas generadas por cada algoritmo en las diferentes regiones evaluadas.



(a) IWO

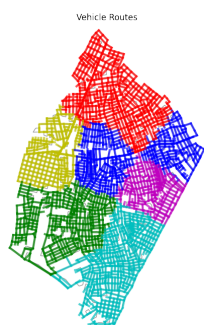


(b) VNS

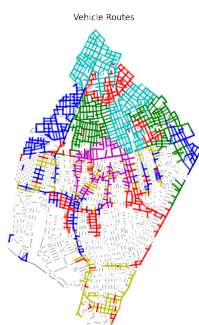


(c) SA

**Figura 1:** Rutas generadas por cada algoritmo en Maramburé, Luque, Paraguay



(a) IWO



(b) VNS



(c) SA

**Figura 2:** Rutas generadas por cada algoritmo en Lambaré, Paraguay



(a) IWO



(b) VNS



(c) SA

**Figura 3:** Rutas generadas por cada algoritmo en Mariano Roque Alonso, Paraguay